



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

NOORA MÄKI-RUUTI

**KORJATUN LUONNONKIVIJULKISIVUN KOSTEUSTEKNINEN
TOIMINTA**

Diplomityö

Tarkastajat:
Dosentti Juha Vinha
DI Pekka Kokko
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Rakennustekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
3. marraskuuta 2010

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

MÄKI-RUUTI, NOORA: Korjatun luonnonkivijulkisivun kosteustekninen toiminta

Diplomityö, 98 sivua, 30 liitesivua

Joulukuu 2010

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: Dosentti Juha Vinha, DI Pekka Kokko

Avainsanat: luonnonkivi, lämpö, kosteus, tuuletus, kuivuminen, rakennusfysiikka, korjausrakentaminen

Työssä selvitettiin Helsingin rautatieaseman kellotornin luonnonkivijulkisivun kosteusteknistä toimintaa. Kohteen alkuperäinen ulkoseinärakenne käsitti ulkoapäin lukien seuraavat rakennekerrokset: itsensä kantava luonnonkiviverhous, taustalaasti ja kantavana rakenteena toimiva tiilimuuraus. Korjattuun ulkoseinärakenteeseen on asennettu taustalaastikerrokseen tuuletuskanavisto sekä lämpökaapelit.

Rakenteen vaurioituminen on seurausta huonosta kosteusteknisestä toiminnasta. Viistosade pääsee imeytymään taustarakenteeseen huokoisten laastisaumojen kautta. Koska saumapinta-alaa on vähän, kuivuminen ulospäin on kuitenkin erittäin hidasta.

Lämpökaapeloinnin tarkoituksena on edesauttaa rakenteen kuivumista tuuletuskanaviston kautta. Tämä tapahtuu lämpötilaa kasvattamalla, jolloin ilmavirtaukset kanavistossa nopeutuvat ja kanaviston kautta poistuu enemmän kosteutta.

Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, kuinka suurella teholla ja kuinka kauan rakennetta tulisi lämmittää, jotta rakenteeseen ei muodostuisi vuosittain kasvavaa kosteuskertymää. Työssä vertailtiin laskennallisesti alkuperäisen seinärakenteen sekä korjatun, tuuletetun ja eri tavoin lämmitetyn seinärakenteen kosteusteknistä toimintaa. Laskelmat tehtiin WUFI 2D-ohjelmalla, käyttäen apuna käsilaskentaa.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös Helsingin rautatieaseman kellotorniin asennetusta mittauslaitteistosta saatuja mittaustuloksia kuuden kuukauden ajalta. Tarkoituksena oli verrata laskelmia mittaustulosten oikeasuuntaisuuden varmistamiseksi. Mittaustulosten tarkastelun tarkoituksena oli myös pohjustaa myöhemmin tehtävää pidempiaikaista seurantatutkimusta.

Tulosten perusteella selvisi, että Helsingin rautatieaseman kellotornin seinärakenteen lämmitys parantaa oleellisesti kuivumisedellytyksiä ja edesauttaa tuuletuskanaviston toimintaa, verrattuna lämmittämättömään tapaukseen. Rakenteen kuivuminen on tehokkainta kun ulkoseinärakennetta lämmitetään kesällä.

Mittaustulosten perusteella selvisi, että mittauslaitteisto toimii hyvin lukuun ottamatta muutamien antureiden kontaktihäiriöitä. Tulokset myös tukivat laskelmista tehtyjä päätelmiä lämmityksen vaikutuksesta tuuletuskanaviston toimintaan. Rakenteen kuivumista ei tuloksista kuitenkaan voinut vielä havaita.

Tulosten perusteella laadittiin lämpötilansäätöohje, jonka mukaan rakennetta lämmitetään maksimiteholla kesällä ja 1/3 teholla keväällä sekä syksyllä. Talvikauden ajan lämmityksen annetaan olla pois päältä. Ratkaisevaa on, että rakenteessa korjauksen jäljiltä oleva kosteus saadaan mahdollisimman nopeasti poistettua. Tämän jälkeen voidaan siirtyä 1/3 lämmitykseen myös kesän osalta, sillä 1/3 lämmitys riittää kuivattamaan julkisivuun imeytyneen viistosateen. Koska työ on ensimmäinen laskennallinen tutkimus luonnonkivirakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta, tulee rakenteen kuivumisen edistymistä seurata myös jatkossa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

MÄKI-RUUTI, NOORA: Hygric behaviour of repaired natural stone faces

Master of Science Thesis, 98 pages, 30 appendix pages

December 2010

Major: Structural engineering

Examiners: Docent Juha Vinha, MSc Pekka Kokko

Keywords: natural stone, heat, humidity, ventilation, drying, building physics, repair of construction

The focus of the study was hygric behavior of Helsinki railway stations clock tower. The original exterior wall structures consists of the following structural layers: natural stone faces, mortars and brick wall. In the repaired exterior wall structures have been added ventilation channels and heat cables in mortars layer.

Damages of wall structures are the result of poor hygric behavior. Rain water absorbs into the wall structures through the seams of a porous mortars. Since the seams of mortars are so thin, drying outwards is very slow.

The aim of heat cables is contribute to the drying of exterior wall. This is done by increasing the temperature of mortars layer, when air flow will become faster and ventilation channels leaves more moisture.

The main objective of the study was to determine, how a high output power and how long the structure should be heated, in order to avoid annually growing water content. Water content of repaired, different ways heated and ventilated structures was compared with original structure. Calculations were made by using the computer program called WUFI 2D. Some part of calculations was made manually.

It was also installed the measuring equipments in Helsinki railway station clock tower. One part of the study was view results of the measurements for the period of six months. The aim was to compare the calculations and the results of the measurements.

It became clear that in the light of the results heating of the structure improved drying of and activity of the ventilation channel, compared to the unheated case. Drying of the structure is most effective when the exterior wall is heated in the summer.

On the basis of the results of the measurements, it became clear that the measuring equipment is working well. The results of the measurements also supported the conclusions that heating effects on activities of the ventilation channel. On the basis of the measurements could not detect dehumidification of structure yet.

On the basis of the results, it was recommended that the structure of the heat maximum power in summer and 1/3 power in the spring and autumn. In the winter heating was recommended in the off mode. It is essential that the moisture, which is in the wall structure, can be removed as quickly as possible. After that, the structure could heat 1/3 power in summer also, since rain water can dry in 1/3 power heating. It is also important to monitor water content of the structure in the future, because the work is the first computational research that is done in hygric behavior of repaired natural stone faces.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksella. Työn rahoittajina toimivat VR-Yhtymä Oy ja Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy.

Työn tarkastajia Dosentti Juha Vinhaa ja DI Pekka Kokkoa (Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy) haluan kiittää työn tarkastamisesta, ohjauksesta ja neuvoista. Kiitän myös professori Matti Penttiä sekä DI Ari Leppäniemeä (Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy) työn tarkastamiseen osallistumisesta sekä neuvoista, erityisesti kandidaatintyön osalta.

Rakennuttamispäällikkö Markku Auraa (VR-Yhtymä Oy) haluan kiittää mahdollisuudesta tämän työn tekemiseen. Toimitusjohtaja Simo-Pekka Valtosta (Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy) kiitän mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta sekä neuvoista, joita olen aina kysyessäni saanut.

Haluan myös kiittää kaikkia Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:n suunnittelijoita, jotka ovat osallistuneet Helsingin rautatieaseman kellotornin (sekä aiempien vastaavien kohteiden) korjauksen suunnitteluun. Kiitän myös Tuukka Hakkarasta ja Elina Maneliusta neuvoista WUFI-ohjelman käytössä.

Lopuksi haluan vielä kiittää miestäni Aria ja poikaani Heikkiä korvaamattomasta tuesta sekä pitkästä pinnasta tämän diplomityöprojektin aikana.

Helsingissä 30. marraskuuta 2010

Noora Mäki-Ruuti

Sisällys

1.	JOHDANTO.....	1
1.1.	TUTKIMUKSEN TAUSTA	1
1.2.	TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA TAVOITTEET	2
1.3.	TUTKIMUS – JA SUUNNITTELUMENETELMÄT	2
1.4.	TYÖN RAJAUKSET	3
2.	LÄHTÖKOHDAT	4
2.1.	ALKUPERÄINEN ULKOSEINÄRAKENNE	4
2.2.	MATERIAALIT JA NIIDEN OMINAISUUDET	5
2.2.1.	Luonnonkivi	5
2.2.2.	Tiilet.....	7
2.2.3.	Laastit	9
2.3.	VAURIOTAVAT	11
2.3.1.	Rasitustekijät ja turmeltumisilmiöt	11
2.3.2.	Tiilien vaurioituminen	11
2.3.3.	Laastin vaurioituminen	12
2.3.4.	Luonnonkivien vaurioituminen	13
2.3.5.	Raudotteiden korroosio	13
2.3.6.	Muut vauriot	14
2.4.	KUNTOTUTKIMUKSET	14
2.4.1.	Yleistä	14
2.4.2.	Kuntotutkimuksen vaiheet	15
2.5.	YLEISET KORJAUSPERIAATTEET.....	16
2.5.1.	Yleistä	16
2.5.2.	Kevyet korjaukset	17
2.5.3.	Raskaat korjaukset	20
2.5.4.	Muita korjauksia.....	21
2.5.5.	Korjauksessa huomioitavaa	21
2.6.	HELSINGIN RAUTATIEASEMAN KELLOTORNIN KORJAUS	22
2.6.1.	Yleistä	22
2.6.2.	Alkuperäinen rakenne	22
2.6.3.	Rakenteen vauriot	23
2.6.4.	Korjaustavat	24
3.	RAKENTEEN KOSTEUSPITOISUUDEN SEURANTA	27
3.1.	YLEISTÄ.....	27
3.2.	MITTAUSMENETELMÄT	27
3.2.1.	Mittauslaitteiston rakenne.....	28
3.2.2.	Mittauslaitteiston toiminta	30
4.	KOSTEUSTEKNISEN TARKASTELUN LÄHTÖKOHDAT	31
4.1.	KOSTEUSTEKNISEN TARKASTELUN VAIHEET.....	31
4.2.	LÄMPÖ.....	31
4.2.1.	Määritelmiä	32
4.2.2.	Lämmön siirtymismuodot	32
4.3.	KOSTEUS	33

4.3.1.	Sade	33
4.3.2.	Ilman kosteus	34
4.3.3.	Maaperän kosteus	35
4.3.4.	Rakennuskosteus	36
4.4.	KOSTEUDEN SITOUTUMINEN	36
4.4.1.	Kosteuden sitoutumismuodot	36
4.4.2.	Tasapainokosteus	37
4.5.	KOSTEUDEN SIIRTYMISMUODOT	38
4.5.1.	Vesihöyryn diffuusio	39
4.5.2.	Vesihöyryn konvektio	41
4.5.3.	Kapillaarinen siirtyminen	42
4.5.4.	Pintadiffuusio	44
4.5.5.	Painovoimainen siirtyminen	44
4.6.	RAKENTEEN KOSTUMINEN JA KUIVUMINEN	44
4.6.1.	Kosteuden kerääntyminen luonnonkivijulkisivuissa	46
4.6.2.	Luonnonkivijulkisivujen kuivuminen	49
5.	RAKENTEEN KOSTEUSTEKNINEN TARKASTELU	53
5.1.	TUTKIMUSAINEISTO	53
5.1.1.	Laskentaohjelma	53
5.1.2.	Mallinnettava rakenne	53
5.1.3.	Materiaaliominaisuudet	54
5.1.4.	Ilmasto-olosuhteet	55
5.1.5.	Alkuolosuhteet	56
5.2.	TUTKIMUSMENETELMÄT	57
5.2.1.	Rakennetyyppi US1	57
5.2.2.	Rakennetyyppi US2	58
6.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	60
6.1.	KOSTEUSTEKNISEN TARKASTELUN TULOKSET	60
6.1.1.	Rakennetyyppi US1	60
6.1.2.	Rakennetyyppi US2_0	64
6.1.3.	Rakennetyyppi US2_1	69
6.1.4.	Rakennetyyppi US2_3	74
6.1.5.	Rakennetyyppi US2_4	79
6.2.	MITTAUSTULOKSET	84
6.2.1.	Mittauspiste 4	85
6.2.2.	Mittauspiste 5	87
6.3.	TULOSTEN TARKASTELU	90
6.3.1.	Rakennetyyppi US1	90
6.3.2.	Rakennetyyppi US2_0	91
6.3.3.	Rakennetyyppi US2_1	91
6.3.4.	Rakennetyyppi US2_3	92
6.3.5.	Rakennetyyppi US2_4	92
6.3.6.	Mittautulokset	92
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET	94
7.1.	PÄÄTELMÄT	94

7.2.	SUOSITUKSET	95
7.3.	JATKOTUTKIMUKSET.....	95
LÄHDELUETTELO		97
LIITE 1: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET, RAKENNETYYPPI US1		99
LIITE 2: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET, RAKENNETYYPPI US2_0		102
LIITE 3: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET, RAKENNETYYPPI US2_1		106
LIITE 4: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET, RAKENNETYYPPI US2_3		110
LIITE 5: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET, RAKENNETYYPPI US2_4		114
LIITE 6: LASKENTAOHJELMAN MATERIAALIOMINAISUUDET		118
LIITE 7: LASKUESIMERKKI		128

SYMBOLIT

λ	materiaalin lämmönjohtavuus
d	materiaalin paksuus
ΔT	lämpötilaero
r	tuulen nopeus
W_{wdr}	viistosade seinäpinnalle
W_h	sademäärä vaakapinnalle
v_{sat}	kyllästyskosteuspitoisuus
φ	suhteellinen kosteus
v	vesihöyrypitoisuus
v_i	sisäilman vesihöyrypitoisuus
v_e	ulkoilman vesihöyrypitoisuus
G	kosteuden tuotto sisällä
n	ilman vaihtuvuus aikayksikössä
V	tarkasteltavan tilan tilavuus
w	kosteuspitoisuus
w_0	rakentamisvaiheessa rakenteessa oleva vesimäärä
w_∞	tasapainokosteus ympäristön kanssa käyttöolosuhteissa
δ_v	aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna
D_a	ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmaistuna
δ_a	ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna
v_s	vesihöyrypitoisuus rakenteen pinnassa
v_a	vesihöyrypitoisuus ympäröivässä ilmassa
β_v	pinnan kosteudensiirtokerroin
α_{conv}	pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin
α_{rad}	säteilyn lämmönsiirtokerroin
ρ_a	ilman tiheys
c_{pa}	ilman ominaislämpö
R_a	virtaava ilmamäärä
κ_a	aineen ilmanläpäisevyys
p_i	sisäilman ilmanpaine
p_e	ulkoilman ilmanpaine
η_a	ilman dynaaminen viskositeetti
ρ	nesteen tiheys
g	putoamiskiihtyvyys
h	nousukorkeus
σ	veden pintajännitys, joka nostaa vettä ylöspäin putken reunoilla

θ	reunakulma veden pinnan ja putken seinämän välillä
r_k	kapillaariputken säde
A_w	kapillariteettikerroin (veden imeytymiskerroin)
t	aika
B_w	vedentunkeutumiskerroin
k_w	materiaalin permeabiliteetti vedelle
η_w	veden dynaaminen viskositeetti
κ_w	kosteudenjohtavuus
ρ_0	materiaalin kuivatiheys
D_w	kosteudifusiviteetti
T_i	sisäilman lämpötila
T_e	ulkoilman lämpötila
$v_{sat(T)}$	vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus rakenteen pinnassa
$v_{(T)}$	huokosilman vesihöyrypitoisuus materiaalin pinnassa
r_a	ilman virtausnopeus tuuletuskanavistossa
R_a	ilman tilavuusvirta tuuletuskanavistossa
A	tuuletuskanaviston pinta-ala
V	tuuletuskanaviston ilmatilavuus
v_{in}	tuuletuskanavaan tulevan ilman vesihöyrypitoisuus
v_{out}	tuuletuskanavasta poistuvan ilman vesihöyrypitoisuus
T_0	ilman lämpötila vastaavassa tuulettumattomassa kanavassa
T_{in}	tuuletuskanavaan tulevan ilman lämpötila
k	kertahäviökerroin
f	kitkakerroin
γ_a	ilman kinemaattinen viskositeetti

1. JOHDANTO

1.1. Tutkimuksen tausta

Tämän diplomityön aiheena on korjatun luonnonkivijulkisivun kosteustekninen toiminta. Työn lähtökohtana on kandidaatintyö: Helsingin rautatieaseman kellotornin korjaus (1), jossa on käsitelty luonnonkiviverhotun massiivitiilirakenteen raskasta korjausmenetelmää. Aikaisemmista vastaavista korjauskohteista poiketen Helsingin rautatieaseman kellotorniin on asennettu lämpökaapelit kiviverhouksen taakse.

Luonnonkiviverhouksen käyttö julkisivuissa yleistyi 1900-luvun alussa – aikana, jolloin kansallisromanttinen suuntaus oli voimissaan. Tämän aikakauden rakennukset ovat usein rakennushistoriallisesti arvokkaita kansallisia monumentteja, mikä rajoittaa korjausmenetelmien valintaa ja lisää rakenteen käyttöikävaatimuksia.

Aikakaudelle tyypilliseen tapaan kantavana rakenteena oli massiivitiilimuuraus. Luonnonkiviverhous toimi itsensä kantavana ja oli sidottu tiilimuuraukseen joko erillisin siidekivin tai teräskiinnikkeillä. Seinärakenteessa ei ollut tuuletusrakoa luonnonkiven ja tiilimuurausten välissä, vaan rakennekerrosten ajateltiin toimivan yhdessä. Joissakin rakennuksissa käytettiin kivihiilitervaa tai bitumisivelyä vedeneristeenä kiviverhouksen ja tiilimuurin välissä.

Rakenteen pääasiallinen kosteusrasituksen lähde on viistosade. Myös huonosti toimivat liitokset aiheuttavat suuria paikallisia kosteusrasituksia. Rakennusmateriaalina luonnonkivi on erittäin tiivis, luja ja hyvin lämpöä johtava. Tiili ja laasti ovat huokoisia ja kohtalaisen lujia materiaaleja, joille on ominaista hyvä kosteudenjohtavuus. Viistosade aiheuttaa tiiviille kivipinnalle vesikalvon, josta kosteus pääsee imeytymään huokoisten laastisaumojen kautta kapillaarisesti rakenteisiin. Luonnonkiven tiiveydestä johtuen rakenteen kuivuminen ulospäin tapahtuu laastisaumojen kautta. Koska läpäisevää pinta-alaa on vähän, kuivuminen ulospäin on hyvin hidasta, ja rakenteen pääasiallinen kuivumissuunta on sisäänpäin. Luonnonkiven tiiveys ja hyvä lämmönjohtokyky aiheuttavat myös kosteuden kondensoitumista taustalaastikerroksessa. Nämä tekijät yhdessä aiheuttavat taustalaastikerrokseen kosteuden kertymistä ja mahdollistavat taustalaastin sekä tiilimuurausten pakkasrapautumisen.

Luonnonkiviverhottujen massiivitiilirakenteiden korjaamiseen on kevyitä ja raskaita korjausmenetelmiä. Kevyitä menetelmiä ovat laastisaumojen ylläpitosaumaus, syväsaumaus ja luonnonkivien lisäkiinnitys. Raskaana korjausmenetelmänä on käytössä luonnonkiviverhouksen purku ja uudelleenrakentaminen, johon sisältyy tuuletuskanaviston asennus luonnonkiviverhouksen taakse. Julkisivukorjauskohteita, joihin on käytetty raskasta korjausmenetelmää, ovat Helsingin kallion kirkko, Turun taidemuseo, Tampereen tuomiokirkko ja Helsingin rautatieaseman kellotorni.

1.2. Tutkimuksen tarkoitus ja tavoitteet

Työn tarkoituksena on perehtyä korjatun, luonnonkiviverhotun massiivitiilijulkisivun kosteustekniseen toimintaan. Esimerkkikohteena käytetään todellista korjauskohdetta eli Helsingin rautatieaseman kellotornia.

Kohteen alkuperäinen ulkoseinärakenne käsittää itsensä kantavan luonnonkiviverhouksen, joka on sidottu kantavaan tiilimuuraukseen teräskiinnikkeiden avulla. Aikaisemmissa kohteissa, joissa on tehty raskaita korjauksia, luonnonkiviverhouksen taakse on asennettu tuuletuskanavisto. Uutena korjatun rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä parantavana keinona on Helsingin rautatieaseman kellotorniin asennettu lämpökaapelointi taustalaastikerrokseen.

Esimerkkikohteena toimiva Helsingin rautatieaseman kellotorni on suurimmaksi osaksi kylmää tilaa. Koska tornin lämpötila on lähellä ulkoilman lämpötilaa, alkuperäisen rakenteen kuivuminen sisäänpäin on ollut hidasta. Lämpökaapeloinnin tarkoituksena on tehostaa rakenteen kuivumista tuuletuskanaviston kautta lämpötilaa kasvattamalla. Taustalaastin lämmittäminen vähentää myös kondensoitumista kiviverhouksen takana.

Tutkimuksen päätavoitteena on määrittää kuinka suurella teholla ja kuinka kauan korjattua rakennetta tulisi lämmittää, jotta kosteuspitoisuus rakenteessa ei kohoa haitalliselle tasolle. Tavoitteeseen pääsemiseksi verrataan laskennallisesti alkuperäisen rakenteen sekä korjatun, eri tavoin lämmitetyn rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Koska korkeilla lämpötiloilla ja lämmitysteholla kaapeleiden käyttöikä lyhenee, on optimaalisen lämmityksen säädön kehittäminen keskeistä rakenteen korjauksen onnistumisen ja korjauksen pitkän käyttöiän kannalta.

Raskaiden julkisivukorjauksien onnistumista kosteustekniseltä kannalta ei ole seurattu käytännössä. Esimerkkikohteeseen on asennettu mittauslaitteisto kosteuspitoisuuden seuraamista varten. Työssä on lisäksi tarkoituksena vertailla laskelmia ja mittaustuloksia kuuden kuukauden ajalta, niiltä osin kuin tulokset ovat vertailukelpoisia. Rakenteen kosteuspitoisuuden seuranta on tarkoitus jatkaa myöhemmin tehtävällä pitkäaikaisella seurantatutkimuksella, jossa selvitetään tarkemmin korjauksen onnistumista.

1.3. Tutkimus – ja suunnittelumenetelmät

Työssä tutkitaan laskelmin luonnonkiviverhotun massiivitiilijulkisivun kosteusteknistä toimintaa ja lämmityksen säädön vaikutusta korjatun rakenteen kuivumiseen. Tutkittavia rakenteita ovat vanha rakenne ja korjattu rakenne eri lämmitystehoilla.

Tutkimusta varten tarvittavina lähtötietoina selvitetään tornin ilmasto-olosuhteet, rakennepaksuudet sekä materiaalien kosteustekniset ominaisuudet. Nämä tiedot määritetään vanhan rakenteen herkkyystarkastelulla. Lisäksi selvitetään lämmityskaapeleiden ominaisuudet ja lämmityksen säätöperiaatteet.

Työssä tehtäviä pääasiallisia laskentatarkasteluja ovat:

- lämmön siirtyminen rakenteessa

- kosteuden siirtyminen rakenteessa
- ilmavirtausten tarkastelu tuuletuskanavistossa
- rakenteen kostumis- ja kuivumistarkastelu

Muita tarkasteluja ovat:

- kosteuden kulkusuunnan muuttuminen eri vuodenaikoina
- sisä- ja ulkoilman olosuhteiden vaihtelu

Laskelmat tehdään WUFI-ohjelmalla ja niitä täydennetään soveltuvin osin käsilaskennalla.

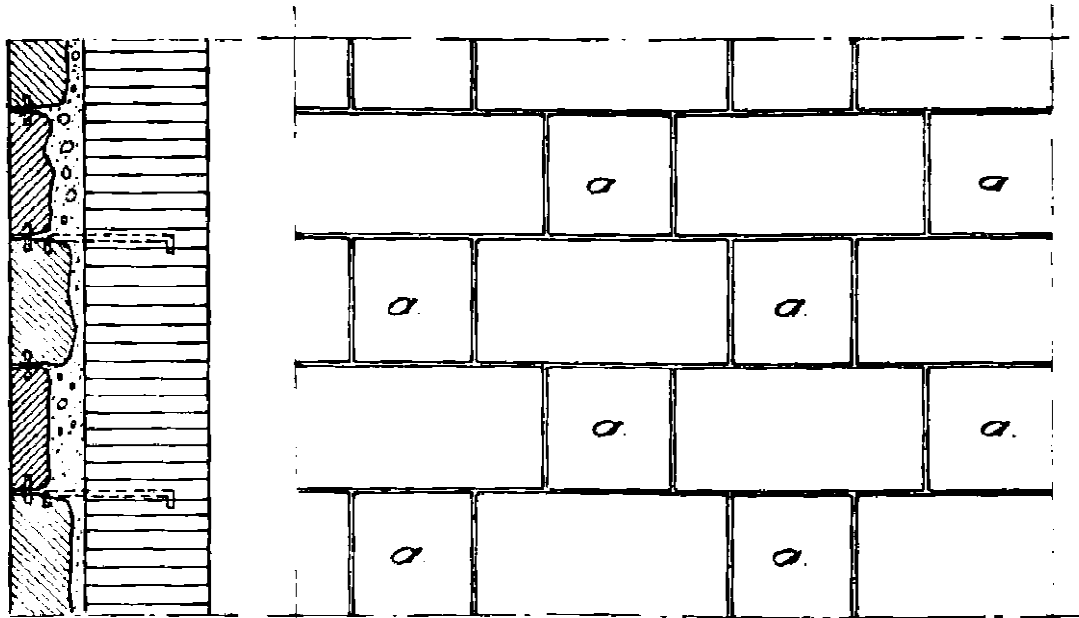
1.4. Työn rajaukset

Tässä työssä keskitytään luonnonkiviverhottujen massiivitiilirakenteiden kosteusteknisen toiminnan tutkimiseen, sekä lämmityksen vaikutukseen rakenteen kuivumisen kannalta. Rakenteen vaurioitumista ja korjausperiaatteita käydään läpi vain yleisellä tasolla. Kosteuspitoisuuden pitkäaikainen seuranta ei kuulu tähän työhön, vaan kosteusmittaustulosten tarkastelu rajataan kuuden kuukauden ajalle.

2. LÄHTÖKOHDAT

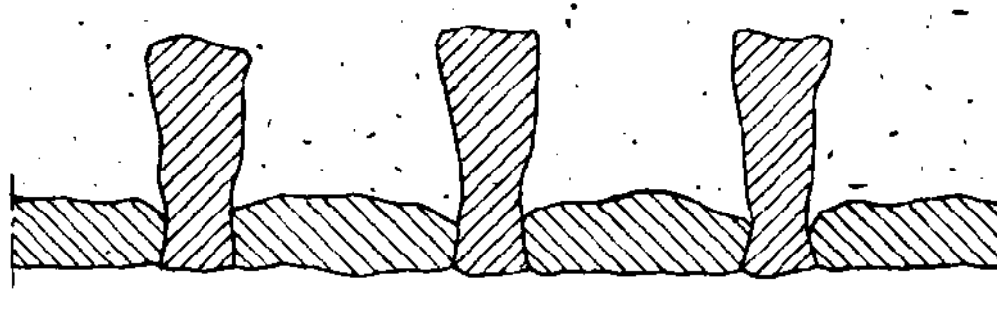
2.1. Alkuperäinen ulkoseinärakenne

Luonnonkiviverhoiltu ulkoseinärakenne koostuu kantavana rakenteena toimivasta massiivitiilimuurauksesta ja itsensä kantavasta luonnonkiviverhouksesta. Rakennekerrosten välissä ei ole tuuletusrakoa, vaan luonnonkiviverhous on muurattu yhteen tiilimuurin kanssa muodostaen yhtenäisen stabiilin kokonaisuuden (Kuva 2.1). Sisäpinnat on oikaistu usein rappauksella.



Kuva 2.1 Luonnonkiviverhoiltu ulkoseinärakenne, sidekivet merkitty a:lla. (2)

Luonnonkiviverhous on sidottu kantavaan rakenteeseen joko erillisin sidekivin tai teräskiinnikkeiden avulla. Rakenteen sidonta on voitu tehdä myös edellisten yhdistelmänä. Ankkurointi teräskiinnikkeillä tapahtui siten, että kivet kiinnitettiin ensiksi toisiinsa rautatapeilla ja sen jälkeen sidottiin tiilimuriin hakarautojen avulla (Kuva 2.1). Ruostumisen estämiseksi tapit kastettiin sulaan sinkkiin, pikeen tai sementtiin (3). Sidekivillä ankkurointi tapahtui upottamalla kivet tiilimuuraukseen tai niin syvälle taustalaastiin, että ne sitoivat rakenteet toisiinsa. Käytetyt sidekivet olivat pitkiä, kapeita ja usein kiilamaisia (Kuva 2.2). Joissakin rakennuksissa luonnonkiviverhous on muurattu niin paksuista kivistä, että erillisiä sidekiviä tai kiinnikkeitä ei tarvita, vaan rakenne säilyttää stabiiliuden laastitartunnan avulla.



Kuva 2.2 Luonnonkiviverhoilun sidonta kiilamaisilla sidekivillä. (2)

Ulkoseinän rakennekerrosten paksuudet voivat vaihdella huomattavasti riippuen rakennuksesta ja sidontatavasta. Teräskiinnikkeillä sidotussa rakenteessa tiilimuurin paksuus on yleensä 600–700 mm ja luonnonkiven 100–300 mm. Sidekiviä käytettäessä kiviverhous voi olla hieman ohuempi ja tiilimuuraus paksumpi. Ilman sidontaa olevien luonnonkivien paksuudet ovat puolestaan suurempia, tiilimuurauksen ollessa ohuempi. Rakennepaksuudet ovat myös suuremmat rakennusten alimpien kerrosten ulkoseinissä sekä kirkkojen ja muiden massiivisten rakennusten ulkoseinissä.

Kosteuden eristämiseksi on joissakin rakennuksissa käytetty kivihiilitervaa tai bitumisivelyä luonnonkiviverhouksen taustalla. Ankarimmin rasitetuissa kohdissa on edellisen lisäksi tiilimuurauksen saumat voitu tehdä asfaltilla (3). Kovalle rasitukselle tai veden kuluttavalle vaikutukselle alttiina olevissa rakenteissa on lisäksi voitu käyttää lyijyä rasituksien tasaamiseen. Lyijyä on käytetty luonnonkivien pintasaumauksissa, levyinä vaakasaumoissa tai se on voitu valaa sulana saumoihin (2).

2.2. Materiaalit ja niiden ominaisuudet

Muuratulla rakenteella tarkoitetaan muurauskappaleiden sekä väliaineen muodostamaa yhtenäistä rakennetta. Muurauskappaleina toimivat yleensä erilaiset tiilet, mutta myös luonnonkiviä sidotaan toisiinsa (sekä tiilimuriin) laastien avulla. Muuratun rakenteen ominaisuuksiin vaikuttavat sekä muurauskappaleiden että laastin ominaisuudet, mutta ratkaisevaa kestävyyden kannalta on kuitenkin niiden yhteistoiminta.

Luonnonkiviverhottujen massiivitiilirakenteiden muuraukseen käytettyjä pääasiallisia materiaaleja ovat luonnonkivi, tiilet sekä niiden sitomiseen tarvittava laasti. Lisäksi on ulkoseinään liittyviä rakenteita, kuten teräksestä valmistetut kiinnikkeet.

2.2.1. Luonnonkivi

Luonnonkivellä tarkoitetaan luonnon muovaamaa kiveä, jota mekaanisesti muokkaamalla käytetään rakennusaineena. Kivet voidaan jaotella syntytapansa mukaan magma-kiviin, sedimenttikiviin ja metamorfisiin kiviin. Rakentamisessa käytettäviä kivilajeja ovat mm. graniitti, gneissi, kalkkikivi, hiekkakivi, marmori ja vuolukivi. Luonnonkiviverhottujen massiivitiilijulkisivujen rakentamiseen on Suomessa käytetty pääasiassa

graniittia. Myös vuolukiveä on käytetty, lähinnä koristeosien tekemiseen. Joissain yksittäisissä kohteissa on myös tavattu hiekkakiveä. (4), (2)

Luonnonkiville tyypillisiä fysikaalisia ominaisuuksia ovat tiiviys, kovuus, lujuus ja hyvä lämmönjohtavuus. Nämä ominaisuudet ovat riippuvaisia kivilajien sisältämistä mineraaleista, sillä kullakin mineraalilla on erilainen kemiallinen koostumus ja kiderakenne. Eri kivilajien välillä ominaisuudet voivat vaihdella suuresti. Myös kivilajien sisäinen vaihtelu voi olla huomattavaa. Tämä johtuu siitä, että mineraalien pitoisuudet vaihtelevat kivilajien sisällä. Taulukossa (Taulukko 2.1) on esitetty yleisimpien luonnonkivilajien fysikaalisia ominaisuuksia. Varmin keino ominaisuuksien selvittämiseksi on kuitenkin määrittää ne suoraan kyseisestä kivierästä. (4)

Taulukko 2.1 Luonnonkivien fysikaalisia ominaisuuksia. (4), (5)

Kivi- tyyppi	Brutto- tiheys (kg/ m ³)	Huokoi- suus (tilavuus- %)	Veden- imukyky (paino- %)	Puris- tuslu- juus (MPa)	Ko- vuus (Mohs)	Kimmo- moduuli (MN/ m ²)	Lämpö- laajene- minen (10 ⁻⁶ 1/K)	Läm- mönjoh- tavuus (W/mK)
graniitti	2500- 2800	0,4-1,5	0,1-0,5	150- 300	6	30-60	5-9	3
gneissi	2600- 3000	0,4-2,0	0,1-0,6	160- 280	5-6	40-100	5-8	
kalk- kikivi	2600- 2800	0,5-2,0	0,2-0,6	80-180	3	40-70	3-6	
hiekkakivi	2000- 2600	0,5-25,0	0,2-9,0	30-180	5-6	8-20	3-10	
marmori	2600- 2900	0,5-2,0	0,2-0,6	80-160	3-4	50-80	3-5	3
vuolukivi	2900- 3000	0,1-0,5	0,1-0,5	20-30	2-3	30-35	20	6,4

Luonnonkiven käyttökelpoisuutta arvioitaessa säänkestävyys on yksi merkittävimmistä kriteereistä. Säänkestävyyden määrittämiseksi tarkastellaan kivien pakkasenkestävyyttä. Tätä voidaan arvioida esimerkiksi mittaamalla vedenimukykyä tai jäädytys-sulatuskokeen avulla. Graniiteilla ja muilla syväkivilajeilla on yleisesti ottaen hyvä säänkestävyys. (4)

Graniitti

Graniitti kuuluu syväkivilajeihin, jotka ovat muodostuneet syvällä maankuoressa hitaasti kiteytymällä sulasta magmasta. Graniitin pääasialliset mineraalit ovat kvartsi (10–30%), kalimaasälpä (40–70%), plagioklaasi (10–30%) ja biotiitti (3-10 %). Lisäksi on muutamia prosentteja muita mineraaleja. Väriltään graniitti voi olla harmaa, punertava, ruskehtava tai vihertävä. Väri ja fysikaaliset ominaisuudet riippuvat mineraalien osuuksista ja koostumuksista. (4)

Graniitti on suuresta kvartsipitoisuudesta johtuen kovaa (6 Mohs) ja lujaa (puristuslujuus $150\text{--}300\text{ MN/m}^2$). Kovuudesta johtuen graniitin kulutuksenkestävyys on hyvä. Tiheys graniitilla on suuri (luokkaa $2500\text{--}2800\text{ kg/m}^3$) ja huokoisuus pieni (0,4-1,5 tilavuus-%). Nämä ominaisuudet tekevät graniitista tiiviin ja hyvin säänkestävän rakennusmateriaalin. Lisäksi graniitille on ominaista hyvä lämmönjohtavuus. Tämän vuoksi rakenteita ei ole tehty pelkästään siitä, vaan taustalla on ollut paremmin lämpöä eristävä tiilimuuraus.

Vuolukivi

Vuolukivi kuuluu metamorfisiin eli muuttuneisiin kivilajeihin. Se on syntynyt oliivikivien muuttumisen tuloksena. Päämineraaleja vuolukivellä ovat talkki, karbonaatit ja kloriitti. Väriltään se on harmaata tai vihertävän harmaata. (4)

Vuolukivelle tunnusomaisia piirteitä ovat pehmeys (2-3 Mohs) ja helppo työstettävyys. Tämän vuoksi sitä on käytetty koristeosien tekemiseen luonnonkivijulkisivuissa. Pehmeistä mineraaleista johtuen vuolukiven kulutuksenkestävyys on huono ja puristuslujuus pieni, mikä rajoittaa sen käyttöä rakentamisessa. Vuolukivi on kuitenkin suhteellisen tiivis materiaali (suuri tiheys ja pieni huokoisuus), ja tästä johtuen sillä on hyvä säänkestävyys. Nykyään vuolukiveä käytetään enimmäkseen tulisijoissa, hyvien lämpöteknisten ominaisuuksien takia.

Hiekkakivi

Hiekkakivi kuuluu syntytapansa perusteella sedimenttikivilajeihin. Sedimenttikivet eli kerrostuneet kivet syntyvät eroosion vaikutuksesta irtonaisen kiviaineksen kerrostuessa ja kovettuessa (4). Hiekkakiven ominaisuudet riippuvat pitkälti sen sisältämän kivettyneen hiekan ominaisuuksista, joten tästä syystä fysikaaliset ominaisuudetkin vaihtelevat huomattavasti (Taulukko 2.1).

2.2.2. Tiilet

Tiilikivillä tarkoitetaan yleensä poltettuja tiiliä. Muita muurauskappaleita ovat mm. kalkkihiekkatiilet ja erilaiset harkot. Luonnonkivijulkisivujen taustamuuraukseen on käytetty poltettuja tiiliä.

Yleiset ominaisuudet (6)

Taulukossa (Taulukko 2.2) on esitetty poltettujen tiilien tyypillisiä fysikaalisia ominaisuuksia. Erityistä poltetuille tiilille on kyky kestää ympäristön aiheuttamia rasituksia.

Taulukko 2.2 Poltetun tiilen fysikaalisia ominaisuuksia. (6), (7)

Tiheys (kg/m ³)	Huokoisuus (tilavuus- %)	Vesihöyryn- läpäisevyys (10 ⁻¹² kg/ msPa)	Vedenimu- nopeus (kg/ m ² min)	Vedenimu- kyky (paino- %)	Puris- tuslu- juus (MPa)	Lämpö- laajene- minen (10 ⁻⁶ 1/K)	Läm- mönjoh- tavuus (W/mK)
1100- 1600	10-50	42-10	0,2-5,0	1-25	15-45	4-6	0,5-0,7

Poltettujen tiilien huokoisuus on tyypillisesti 10–50 tilavuus- %. Tiilessä olevat huokokset voidaan jakaa koon perusteella kolmeen luokkaan: adsorptiohuokokset ($d < 0,1 \mu\text{m}$), kapillaarihuokokset ($d = 0,1 \dots 10 \mu\text{m}$) ja gravitaatiohuokokset ($d > 10 \mu\text{m}$). Adsorptiohuokokset täyttyvät adsorptiovedestä. Kapillaarihuokosiin vesi imeytyy kapillaarimunan vaikutuksesta. Gravitaatiohuokosiksi kutsutaan huokosia, jotka eivät enää täyty kapillaarisesti.

Tiilien kosteustekniset ominaisuudet perustuvat pitkälti kapillaarihuokosten osuuteen huokosverkostossa. Tyypillisessä poltetussa tiilessä valtaosa huokostilavuudesta on kapillaarisella alueella, mistä on seurauksena suuri vedenimunoisuus ja kosteudenjohtavuus.

Poltettujen tiilien pakkasenkestävyys perustuu gravitaatiohuokosten määrään ja sijaintiin, sillä ne ottavat vastaan veden jäätymisen aiheuttaman paineen. Edellytyksenä on, että gravitaatiohuokosia on riittävästi ja ne ovat riittävän lähellä toisiaan. Lisäksi pakkasenkestävyyteen vaikuttaa tiilen lujuus ja tiilessä olevan veden määrä jäätymishetkellä.

Tiilen pakkasenkestävyyteen ja lujuuteen voidaan vaikuttaa polttoastetta kasvattamalla. Tiilen valmistuksen yhteydessä massasta poistuu ylimääräinen vesi ja orgaaniset aineet palavat, jolloin tiilikiveen muodostuu pääasiassa kapillaarihuokosista koostuva huokosverkosto. Polttolämpötilaa nostettaessa tiilikivet kutistuvat, huokostilavuus pienenee ja lujuus lisääntyy. Tällöin kapillaarihuokosten osuus pienenee ja gravitaatiohuokosten osuus kasvaa. Tiilen huokosrakenteeseen voidaan polttolämpötilan lisäksi vaikuttaa raaka-ainekoostumuksella ja lisäaineilla.

Poltettujen tiilien lämpötekniset ominaisuudet vaikuttavat osaltaan niiden säänkestävyyteen. Lämpölaajeneminen niillä on melko suuri ($4-6 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$). Huokoisuudesta johtuen poltettujen tiilien lämmönjohtavuus on kuitenkin pieni (0,5-0,7 W/mK).

Poltetuille tiilille on myös ominaista kemiallinen kestävyys. Korkean polttoasteen tiilillä kemiallinen kestävyys on parempi kuin matalan polttoasteen tiilillä.

Vanhon tiilien ominaisuudet

Tiilikiviä on valmistettu Suomessa aina keskiajalta lähtien. Aluksi tiilet valmistettiin käsin työmaan läheisyyteen perustetuissa tilapäistehtaissa, jolloin tiilien ominaisuudet vaihtelivat huomattavasti. Valmistus siirtyi vähitellen tiilitehtaisiin, joista ensimmäiset perustettiin 1800-luvun puolivälissä. 1900-luvun alussa tiilien valmistus tapahtui jo tiilitehtaissa, mutta tiilet tehtiin vielä käsin puristamalla. Valmistus tapahtui ns. märkäme-

netelmällä. Kosteaa raaka-ainemassa puristettiin haluttuun muotoon, minkä jälkeen sen annettiin kuivua ulkoilmassa ennen polttoa. Tiilien poltto tapahtui tiilenpolttouuneissa noin 1000 °C lämpötilassa. Polttoaste vaihteli hieman uunin eri osissa ollen matalimmillaan uunin reunoilla. (8), (2)

Luonnonkivijulkisivujen taustamuuraukseen käytettyjen tiilien ominaisuuksiin vaikuttivat pääasiassa polttoaste ja käytetyn saven laatu. Polttoasteen vaihtelujen johdosta myös tiilien lujuus ja huokoisuus vaihtelivat. Koska tiilet puristettiin käsin, vanhojen tiilien tiheys on pienempi kuin nykyisillä tiilillä. Matalasta polttoasteesta ja alhaisesta tilavuuspainosta on seurauksena se, että vanhojen tiilimuurien pakkasenkestävyys on heikompi kuin nykyaikaisilla menetelmillä valmistetuilla tiilillä. Pakkaskestävyydessä saattaa lisäksi olla huomattavaa paikallista vaihtelua tiilimuurin eri osissa, riippuen muurarin ammattitaidosta kivien valinnassa (rasitettuihin kohtiin pyrittiin valitsemaan paremmin poltetut tiilet).

2.2.3. Laastit

Laastin tarkoituksena on sitoa muurauskappaleet yhteen ja toimia osana näin muodostuvaa muurattua rakennetta. Laasti koostuu sideaineesta, runkoaineesta, vedestä sekä mahdollisista lisäaineista. Sideaineena toimii kalkki tai sementti. Runkoaineena käytetään yleensä hiekkaa. Laastit voidaan jakaa sideaineen perusteella kalkki-, kalkkisementti- ja sementtilaasteihin.

Kalkkilaasti koostuu sammutetun kalkin, runkoaineen ja veden seoksesta. Kalkkilaasti on ilmasideaineista, sillä se kovettuu ilman hiilidioksidin reagoidessa kalsiumhydroksidin kanssa eli se karbonatisoituu. Aluksi kovettuminen tapahtuu pääosin kuivumalla, kun laastissa oleva vesi haihtuu pois. Karbonatisoituminen alkaa rakenteen pinnasta ja hidastuu syvemmälle mennessä sillä hiilidioksidin saanti heikkenee. Tämän vuoksi kalkkilaastin kovettuminen on hidas prosessi ja lujuus saattaakin jäädä alhaiseksi massiivisten rakenteiden keskiosissa. (9), (6)

Sementtilaasti koostuu sideaineena toimivasta portlandsementistä, runkoaineesta ja vedestä. Lisäksi sementtilaasti sisältää yleensä lisäaineita. Sementti kovettuu veden vaikutuksesta eli on luonteeltaan hydraulista. Sementtilaasti kovettuu nopeasti ja saavuttaa suuren lujuuden. Lujuuden kehittyminen edellyttää kuitenkin tuoreen laastin riittävää vesipitoisuutta. (9), (6)

Kalkkisementtilaastin sideaineena käytetään ilmakalkin lisäksi sementtiä. Molemmat kovettumisprosessit tapahtuvat rinnakkain ja ne vaikuttavat toisiinsa. Kalkkisementtilaastin kovettumisnopeus sekä lujuusominaisuudet riippuvat suuresti sideaineiden välisestä suhteesta. (9), (6)

Luonnonkivijulkisivujen muuraukseen on käytetty pääosin kalkkilaasteja. Sementin valmistuksen alettua Suomessa, myös kalkkisementtilaasteja käytettiin luonnonkivijulkisivujen muuraukseen. Vanhojen kalkkisementtilaastien sementtipitoisuus on kuitenkin alhainen, sillä niillä tavoiteltiin lähinnä riittävän alkulujuuden saavuttamista (10).

Ominaisuudet

Laastin kosteusteknisiin ominaisuuksiin ja pakkasenkestävyyteen vaikuttavat huokosrakenne (ks. kohta 2.2.2 tiilet) sekä lujuusominaisuudet, joihin puolestaan vaikuttavat käytetty sideaine, runkoaine, seossuhteet, sekoitustavat, lisäaineet ja tartunta. Eri laastityyppien välillä ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi (Taulukko 2.3).

Taulukko 2.3 Eri laastityyppien fysikaalisia ominaisuuksia. (7), (6), (9)

Laasti- tyyppi	Tiheys (kg/m ³)	Huokoi- suus (tila- vuus- %)	Vesihöyrynlä- päisevyys (10 ⁻¹² kg/msPa)	Vedenlä- päisevyys (l/m ² vrk)	Puris- tuslu- juus (MPa)	Lämpö- laajene- minen (10 ⁻⁶ 1/K)	Läm- mönjoh- tavuus (W/mK)
K-laasti	1700	18–40	20–15	55	3-8	7-9	0,8
KS- laasti	1800	20–35	17–6,5	2,2–7,3	3-15	8-14	0,9
S-laasti	2000	15–30	10-2	2,3	5-15	8-14	1

Tartunta laastien ja muurauskappaleiden välillä on ratkaisevaa muuratun rakenteen säänkestävyyden kannalta. Huono tartunta heikentää rakenteen lujuutta ja edistää kosteuden pääsyä rakenteeseen. Tartunta syntyy, kun laastissa oleva vesi imeytyy kapillaari-imun vaikutuksesta muurauskiviin. Tartunnan kannalta kohtuullisesti imevä alusta on paras. Liian nopea imu aiheuttaa laastin kutistumista, liian hitaan imun johdosta tartunnasta tulee heikko. Tartuntaan vaikuttaa merkittävästi käytetty tiili-laastiyhdistelmä. Tiilien imukyvyyn tulee olla sopiva laastin vesimäärään nähden. Laastin vedenpidätyskyvyyn tulee puolestaan olla sopiva tiilen imukykyyn nähden. Poltettujen tiilien tartunta laastiin on hyvä, johtuen niiden kapillaarisista ominaisuuksista. (9), (6) Luonnonkiven ja laastin välillä tartunta ei voi syntyä kapillaari-imun vaikutuksesta, joten tartunta jää huonommaksi kuin tiilillä. Kalkkilaasti tarttuu luonnonkiviin sementtilaasteja paremmin.

Laastien huokoskoko on pienempi kuin poltetuilla tiilillä. Kalkkilaastien huokoisuus on tyypillisesti välillä 18–40 tilavuus- %, kalkkisementtilaastien 20–35 tilavuus- % ja sementtilaastien 15–30 tilavuus- %. Huokoisuuteen vaikuttaa käytetty sideaine siten, että sementtipitoisuuden lisääntyessä huokoskoko pienenee. Myös tartunta laastin ja muurauskappaleiden välillä vaikuttaa huokoisuuteen ja huokosjakautumaan. Voimakkaan imun johdosta laasti tiivistyy ja siihen muodostuu kapillaarisella alueella oleva huokosverkosto. Heikon imun johdosta laastin huokoskoko jää suuremmaksi. Laastin huokoisuuteen voidaan vaikuttaa myös lisäainein. Lisäämällä laastiin ilmahuokosia muodostavaa lisäainetta, saadaan aikaan suuria gravitaatiohuokosia, jolloin pakkasenkestävyys paranee. (9), (6)

Runkoaineen valinnalla voidaan vaikuttaa laastien lujuusominaisuuksiin. Kun runkoaine sisältää eri raekokoja sopivassa suhteessa, pakkautuvat ne tiiviisti, jolloin tyhjiätilaa jää vähän ja lujuus sekä säänkestävyys paranevat. Runkoaineen raekokojakaumalla

on vaikutusta myös kovettuneen laastin huokosjakautumaan ja sitä kautta laastin säilyvyyteen. (9), (6), (10)

Laastin lujuusominaisuuksiin voidaan vaikuttaa myös sideaineen valinnalla siten, että sementtipitoisuuden lisääntyessä laastin lujuusominaisuudet kasvavat. Kalkkilaastin lujuusominaisuudet ovat sementtilaasteja heikommät ja niihin vaikuttaa merkittävästi kalkkilaastin karbonatisoitumisaste. Karbonatisoituminen tapahtuu hitaasti ulkopinnasta syvemmälle edeten, jolloin lujuus saattaa jäädä pysyvästi alhaiseksi massiivisten rakenteiden keskiosissa (10).

2.3. Vauriotavat

2.3.1. Rasitustekijät ja turmeltumisilmiöt

Turmeltumisilmiöllä tarkoitetaan prosessia, jonka seurauksena rakenteen ominaisuudet heikkenevät. Turmeltumisilmiöt syntyvät ulkoisten tai sisäisten rasitustekijöiden vaikutuksesta rakenteeseen. Edellytyksenä on kriittisen rasitustason ylittyminen. Rasitustekijät voidaan jaotella vaikutustavan mukaan esimerkiksi seuraavalla tavalla (6):

- Mekaaniset rasitukset: gravitaatio, voimat ja muodonmuutokset, liike-energia, värähtely ja äänet
- Sähkömagneettiset rasitukset: säteily, sähköiset ja magneettiset rasitukset
- Lämpö ja lämpötila
- Kemialliset rasitukset: vesi ja liuottimet, suolat, hapot ja emäkset, kemiallisesti neutraalit aineet
- Biologiset rasitukset: kasvit ja mikro-organismit, eläimet

Luonnonkivijulkisivujen pahin rasitustekijä on kosteus eri muodoissaan. Se on osallisena lähes kaikkiin merkittäviin turmeltumisilmiöihin. Lämpötilalla on oleellinen vaikutus kosteusrasitustasoon. Kosteuden käyttäytymistä luonnonkivijulkisivuissa käsitellään tarkemmin luvussa 4.6.

Liiallisesta kosteusrasituksesta aiheutuvat turmeltumisilmiöt voidaan jakaa fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin turmeltumisilmiöihin. Fysikaalisia turmeltumisilmiöitä ovat pakkasrapautuminen ja suolarapautuminen. Kemiallisia turmeltumisilmiöitä ovat korroosio sekä laastin kalsiumkarbonaatin hajoaminen kipsiksi. Biologisia turmeltumisilmiöitä ovat liittyvien puurakenteiden laho- ja homevauriot. Lisäksi lämpötilan sekä kosteuden muutokset aiheuttavat muodonmuutoksia rakenteisiin. Muita kosteudesta aiheutuvia haittavaikutuksia ovat lämmöneristyskyvyn heikkeneminen, ulkonäköhaitat, energiankulutus ja viihtyvyyteen liittyvät haitat. (6)

2.3.2. Tiilien vaurioituminen

Luonnonkivijulkisivun taustamuurauksen vaurioituminen tapahtuu pääosin pakkasrapautumisen vaikutuksesta. Vähäisissä määrin vaurioitumista aiheuttavat myös suolarapautuminen ja muodonmuutokset.

Tiilien kapillaari- ja gravitaatiohuokosissa oleva vesi jäätyy lämpötilan laskiessa nollan alapuolelle. Pienemmissä huokosissa jäätymistä tapahtuu alle -15 °C lämpötilassa. Jäätyessään vesi laajenee noin 9 tilavuus- % ja tarvitsee tätä varten vapaata huokostilaa. Jos jäätyvä vesi ei pääse laajenemaan, aiheuttaa se huokosseinämiin hydraulista painetta, joka voi rikkoa huokosrakenteen. Jääkiteet myös vetävät kosteutta puoleensa, jolloin kosteus siirtyy pienistä huokosista jääkiteisiin, jotka laajenevat. Pakkasrapautuminen on mahdollista, kun rakenne toistuvasti jäätyy ja sulaa. Rakenteessa jäätymishetkellä olevan veden määrä sekä jäätymis-sulamiskertojen määrä vaikuttavat ratkaisevasti pakkasrapautumisen syntyyn. (9), (5)

Tiilien pakkasrapautumista tavataan luonnonkivijulkisivuissa pahimmin rasiitetuissa kohdissa, joissa tiilimuurin uloimman osan kosteuspitoisuus on kapillaarisella alueella. Pakkasrapautumisen määrää vähentää myös se, että tiilimuurin lämpötilavaihtelut ovat huomattavasti rakenteen ulkopintaa pienemmät, jolloin jäätymis-sulamiskertoja tulee vähemmän kuin saumalaastiin. Lisäksi pakkasrapautumisessa esiintyy polttoasteesta johtuvaa paikallista vaihtelua siten, että vajaapolttoiset tiilet ovat rapautuneempia kuin korkeapolttoiset tiilet.

Vanhat, huokoiset tiilimuurit sisältävät runsaasti veteen liukenevia suoloja. Rakenteeseen kulkeutuu suoloja eri lähteistä, kuten ilmasta, sementtipitoisista laasteista, tiilistä, maaperästä ja rakennuksen käytöstä johtuen. Suolat liukenevat veteen ja kulkeutuvat sen mukana rakenteen pinnoille. Veden haihtuessa pinnalta, suolat kiteytyvät uudelleen. Koska useiden suolojen tilavuus kasvaa niiden kiteytyessä, voivat tiilet rapautua toistuvan liukenemisen ja kiteytymisen johdosta. Suolarapautumista tavataan yleensä vanhoissa tiilirakennuksissa, joissa tiilien laatu on vaihdellut huomattavasti. (10) Luonnonkiviverhotuissa massiivitiiliseinissä suolarapautumista esiintyy vain vähäisiä määriä tiilimuurin sisäpinnoilla, jonne kosteus siirtyy kapillaarisesti ja diffuusiolla.

Lämpötilan ja kosteuden vaihtelut aiheuttavat muodonmuutoksia tiilimuriin. Jos nämä muodonmuutokset eivät pääse tapahtumaan esteettömästi, aiheuttavat ne pakko-voimia ja halkeilua. Halkeamat puolestaan edistävät kosteuden pääsyä rakenteeseen ja lisäävät rapautumia. Luonnonkivijulkisivujen taustamuureissa lämpölaajeneminen on kuitenkin pientä, koska auringon säteily ei vaikuta suoraan tiilimuurin pintaan.

2.3.3. Laastin vaurioituminen

Laastit vaurioituvat pääasiassa pakkasrapautumisen vaikutuksesta. Muita vähäisempiä vaurioita aiheuttavat lämpöliikkeet ja kemialliset rasiitustekijät.

Laastien pakkasrapautuminen tapahtuu samalla periaatteella kuin tiilienkin, eli veden jäätymislaajenemisen aiheuttaman paineen johdosta. Pakkasrapautumiseen vaikuttavat rakenteen jäätymisnopeus ja kosteuspitoisuus jäätymishetkellä. Rakenteen kastuminen ja jäätyminen tapahtuvat ulkopinnasta syvemmälle edeten, joten saumalaasti joutuu useammin alttiiksi pakkasrapautumiselle kuin taustalaasti. Saumalaastien pakkasrapautuminen onkin yleisin vaurio luonnonkivijulkisivuissa.

Vaurioitunut saumalaasti edistää kosteuden pääsyä syvemmälle rakenteeseen, jolloin pakkasrapautuminen rakenteessa nopeutuu. Pitkälle rapautunut sauma- ja taustalaasti on hiekkamaista ja kosteus pääsee siinä hyvin vapaasti kulkeutumaan rakenteen eri osiin, jolloin vaurioituminen entisestään nopeutuu. Rapautuessaan taustalaasti aiheuttaa luonnonkiviverhoukseen muodonmuutoksia ja voi näin ollen vaarantaa koko rakenteen stabiiliuden. (5)

Laastien kemiallisella rapautumisella tarkoitetaan erilaisten kemiallisten räsitustekijöiden aiheuttamaa rapautumista. Tällaisia räsitustekijöitä ovat mm. rikkidioksidi, hiilidioksidi ja erilaiset suolat. Ilman sisältämät rikkidioksidi ja hiilidioksidi muodostavat happoa reagoidessaan veden kanssa. Nämä hapot voivat syövyttää kalkkilaastien sideainetta. Laastien rapautuminen suolojen vaikutuksesta tapahtuu samalla tavalla kuin tiilissäkin, eli suolojen kiteytymisen aiheuttaman laajenemisen johdosta. Suolat myös tukkivat laastin huokosrakennetta, jolloin kosteuspitoisuus laastissa kasvaa. (6)

2.3.4. Luonnonkivien vaurioituminen

Suomessa rakennuksissa käytetyissä luonnonkivissä rapautuminen ei yleisesti ottaen ole ongelma johtuen kivien tiiviistä rakenteesta. Poikkeuksen muodostaa hiekkakivi, joka voi paikoitellen olla niin huokoista, että rapautuminen on mahdollista. Luonnonkivet vaurioituvatkin pääasiassa alustaan nähden erilaisten lämpöliikkeiden vuoksi.

Luonnonkiviverhouksen lämpöliikkeet ovat tiilimuuria suuremmat johtuen rakenteen ulkopinnan suuremmasta lämpötilanvaihtelusta. Erilaiset lämpöliikkeet aiheuttavat liike-eron luonnonkivien ja taustarakenteen välille, jolloin rakenteeseen syntyy jännityksiä. Jatkuvasti toistuessaan lämpöliikkeet voivat aiheuttaa laastin ja kivien välisen tartunnan heikkenemistä, kivien halkeilua ja pahimmillaan jopa sidekivien katkeamisia. (5), (11)

2.3.5. Raudoitteiden korroosio

Kosteus aiheuttaa luonnonkivijulkisivuissa myös kivien sitomiseen käytettyjen raudoitteiden korroosiota. Edellytyksiä teräskorroosion käynnistymiselle ovat korroosiosuojauksen puuttuminen, happi sekä elektrolyytinä toimiva vesi. Korroosiosuojauksena on toiminut alkalinen laasti, jonka vaikutuksesta teräksen pinnalle muodostuu passiivikalvo. Raudoitteet on myös voitu kastaa sulaan sinkkiin, pikeen tai sementtiin korroosion estämiseksi. (2), (5), (6)

Laastin karbonatisoitumisen myötä teräksiä suojaava passiivikalvo kuitenkin häviää, jolloin korroosio on mahdollista. Pikeykseen voi myös tulla vaurioita, esimerkiksi lämpöliikkeistä johtuen, jolloin teräsiin voi syntyä paikallista korroosiota. Erityisen vaurioherkkiä ovat terästen taivutetut kohdat. (2), (5), (6)

Terästen korroosio ei yksittäisenä vauriona ole kovin merkittävä. Yhdistettynä pitkälle rapautuneeseen laastiin poikkiruostuneet teräkset voivat kuitenkin aiheuttaa rakenteen stabiiliuden menettämisen.

2.3.6. Muut vauriot

Luonnonkivijulkisivuun päässyt kosteus voi aiheuttaa seinärakenteeseen liittyvien rakenteiden vaurioitumista. Liittyvistä rakenteista pahiten vaurioille alttiita ovat erilaiset puurakenteet, kuten välipohjien sekä vesikaton puurakenteet, jotka imevät kosteutta tiilimuurista.

Puurakenteet vaurioituvat lähinnä lahottajasienten vaikutuksesta. Edellytyksiä vaurioitumiselle ovat riittävä lämpötila ja kosteuspitoisuus sekä happi. Lahottajasienet käyttävät puuta ravinnokseen ja tuhoavat näin sen rakennetta. Puurakenteissa esiintyy myös home- ja sinistäjäsienejä. Ne eivät yleensä vaurioita puuainesta, mutta pilaavat ulkonäön sekä aiheuttavat haju- ja allergiahaittoja. (6)

Puurakenteita voivat vaurioittaa myös hyönteisten toukat. Joissakin tapauksissa toukat ovat vaurioittaneet merkittävästi luonnonkivijulkisivun tiilirakenteisiin liittyviä puupalkistoja.

2.4. Kuntotutkimukset

2.4.1. Yleistä

Kuntotutkimus on systemaattinen tutkimus, jonka tavoitteena on selvittää tutkittavien rakenteiden korjaustarve sekä rakenteiden terveellisyys ja turvallisuus. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi selvitetään rakenteen vaurioiden

- esiintyminen
- aste ja laajuus
- syyt
- vaikutukset sekä
- eteneminen.

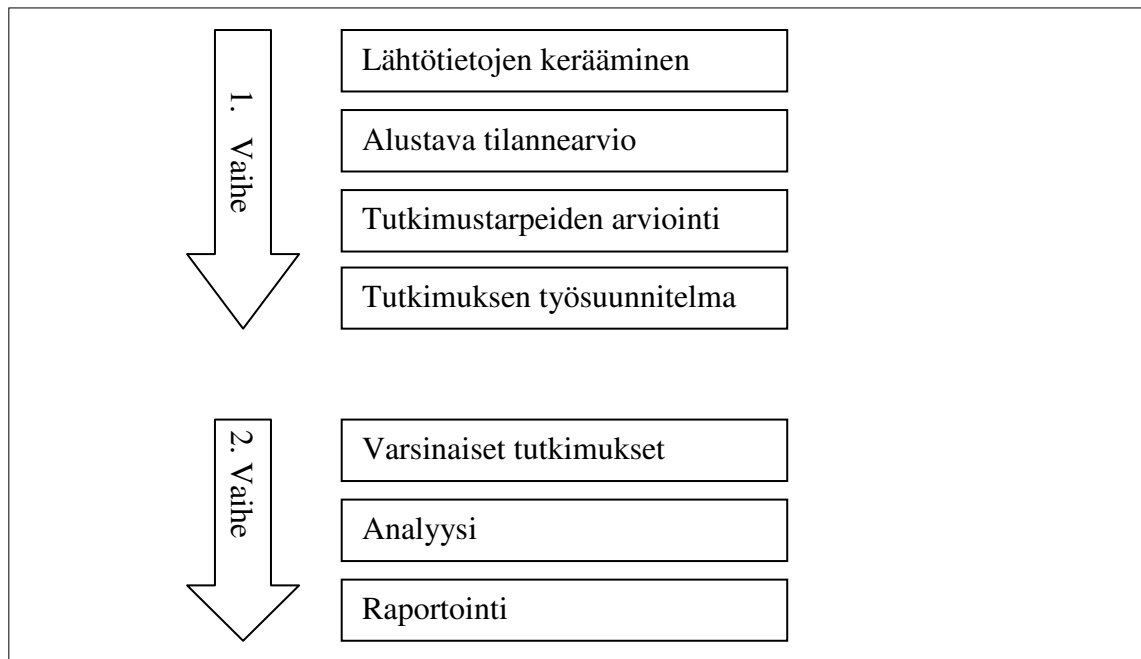
Tutkimustulosten pohjalta arvioidaan rakenteen toimivuutta/kuntoa, korjaustarvetta, soveltuvia korjausmenetelmiä sekä korjauksen toteutusajankohtaa. (12), (13)

Kuntotutkimus on osa kohteen hankesuunnittelua, jonka tehtävänä on tuottaa lähtötietoja sekä asettaa rajoitteita ja tavoitteita varsinaista korjaussuunnittelua varten. Lähtökohtana voi olla havaittu vaurio tai terveydellinen oireilu. Tutkimus voi myös liittyä rakennukseen kohdistuvaan peruskorjaukseen. Joskus kuntotutkimus voi olla tarpeen, kun rakennuksen kunnosta ei ole tarkkaa tietoa. (12), (13)

Luonnonkiviverhottujen tiilirakenteiden kuntotutkimus poikkeaa huomattavasti muiden tiilirakenteiden kuntotutkimuksista. Koska vaurioituminen etenee pääosin pii- lossa, on kuntotutkimuksen (ja korjauksen) oikea ajoittaminen erityisen tärkeää. Tämän vuoksi luonnonkivijulkisivujen kuntotutkimuksiin tarvitaan erityisesti niitä varten kehitettyjä menetelmiä.

2.4.2. Kuntotutkimuksen vaiheet

Kuntotutkimus voidaan jakaa kahteen vaiheeseen kuvan (Kuva 2.3) esittämällä tavalla. Ensimmäisessä vaiheessa hankitaan tarvittavat lähtötiedot, joiden perusteella tehdään tutkimussuunnitelma ja tarjous varsinaisesta kuntotutkimuksesta. Laaja-alaisiin selvityksiin ei tässä vaiheessa yleensä ole mahdollisuutta. Toisessa vaiheessa, tarjouksen hyväksymisen jälkeen, suoritetaan varsinaiset tutkimukset sekä raportointi. Kuntotutkimuksen sisältö ja laajuus vaihtelevat tapauskohtaisesti. (12), (13)



Kuva 2.3 Kuntotutkimuksen vaiheet

Lähtötiedot

Lähtötietojen kerääminen aloitetaan kohteen suunnitteluasiakirjoihin/kohteeseen tutustumalla. Piirustuksia tarkastelemalla pyritään alustavasti arvioimaan rakenteiden rasitus-tasoa ja vaurioalttiutta. Koska rakenteita ei välttämättä ole toteutettu suunnitelmien mukaisesti, vanhoihin asiakirjoihin tulee aina suhtautua varauksellisesti. (12), (13)

Silmämääräinen kartoitus tehdään rakenteita rikkomatta. Tarkoituksena on tarkentaa tutkimustarvetta sekä selvittää tutkimuksen käytännön suorittamista. Lisäksi pyritään arvioimaan näkyvien vaurioiden määrää sekä kohteen rasitusoloja. (12), (13)

Työsuunnitelma

Kohteeseen perehtymisvaiheen jälkeen suunnitellaan varsinaisen tutkimuksen sisältö. Tutkimussuunnitelma sisältää tutkimuksen lähtötiedot ja lähtökohdat, tavoitteet sekä vauriotavat tutkimusmenetelmineen. Työsuunnitelmassa määritetään myös tutkimuksen alustava aikataulu. (12), (13)

Työsuunnitelmaa tehtäessä on tärkeää kohdentaa käytettävissä olevat resurssit mahdollisimman harkitusti tärkeimpien asioiden tutkimiseen. Jos rakenteen kunto selviää yksinkertaisilla toimenpiteillä, ei kalliita menetelmiä kannata käyttää. Ulkonäöltään hyväkuntoisen rakenteen tutkiminen edellyttää yleensä laajempia tutkimustoimenpiteitä kuin rakenteen, jossa vauriot näkyvät jo selvästi päällepäin. (12), (13)

Tutkimukset

Lähtötietojen keräämisen ja tutkimussuunnitelman jälkeen tehdään varsinaiset tutkimukset. Ne sisältävät yleensä kolme vaihetta: kenttätutkimuksen, näytteiden oton ja laboratoriotutkimuksen. Näytteiden otto tapahtuu yleensä kenttätutkimuksen yhteydessä. Tarvittaessa työsuunnitelmaa tarkennetaan vielä ennen kenttätutkimuksia. (12), (13)

Kenttätutkimusten alussa tehdään esiselvitysvaihetta laajempi silmämääräinen kartoitus. Varsinaiset tutkimukset suoritetaan yleensä henkilönostimen korista. Kenttätutkimusvaiheessa käytettäviä tutkimusmenetelmiä ovat:

- laastisaumojen poraus
- kivien vasarointi
- rakenneavaukset sekä
- kosteusmittaukset.

Kenttätutkimusvaiheessa otetaan myös rakennenäytteitä laastisaumoista sekä tiilimuurista. Näitä näytteitä tutkitaan myöhemmin tehtävissä laboratoriotutkimuksissa, joissa selvitetään rakennenäytteiden kosteuspitoisuuksia, huokoisuuksia sekä terveydelle haitallisten aineiden olemassaoloa. (14), (15)

Rakenteen massiivisuudesta johtuen rakenneavauksia voidaan suorittaa rajoitetusti kenttätutkimusten yhteydessä. Pieniä kiviä voidaan irrottaa kenttätutkimusvaiheessa, mutta suurempien kivien kohdalla rakenneavauksia voidaan tehdä vasta telineiden pysyttämisen jälkeen, kun päätös varsinaisesta korjauksesta on jo tehty. Tällaisissa tapauksissa korjauksen laajuus tarkentuu korjaustyön yhteydessä. (14)

Tulosten analysointi

Kuntotutkimusten keskeinen osa on tulosten analysointi. Ilman tulosten huolellista analysointia eivät yksittäiset vaurioita kuvaavat tiedot ole käyttökelpoisia. Tulosten analysointi onkin yksi kuntotutkimusten vaativimmista vaiheista. (12), (13)

Tulosten perusteella arvioidaan vaurioiden tilaa, tehdään johtopäätökset vaurioiden vaikutuksista sekä esitetään ehdotukset korjaustavoille ja korjauksen ajankohdalle. Lopuksi tulokset esitellään raportin muodossa. (12), (13)

2.5. Yleiset korjausperiaatteet

2.5.1. Yleistä

Luonnonkivijulkisivujen korjaustavan valintaan vaikuttavat rakenteen rasisustaso, rakenteen kunto ja korjaamiselle asetetut tavoitteet. Rakenteen rasisustason ja kunnan

selvittämiseksi suoritetaan kohteessa kuntotutkimus. Korjaamiselle asetettavat tavoitteet määritetään yleensä kohdekohtaisesti. Yleiset tavoitteet ovat kuitenkin pääpiirteittäin seuraavat (16):

- Rakenteen on oltava turvallinen.
- Korjauksella tulee tavoitella vähintään 50 vuoden käyttöikää.
- Rakenteen sisäpuoliset kosteusvauriot on estettävä.
- Rakenteen ulkonäköön ei tehdä muutoksia.
- Korjaus on voitava tehdä vaiheittain ja alueittain.
- Korjaustavan on oltava taloudellinen suhteessa käyttöikään.
- Rakenteen kunnon seuranta ja ylläpito tulee olla helppoa.

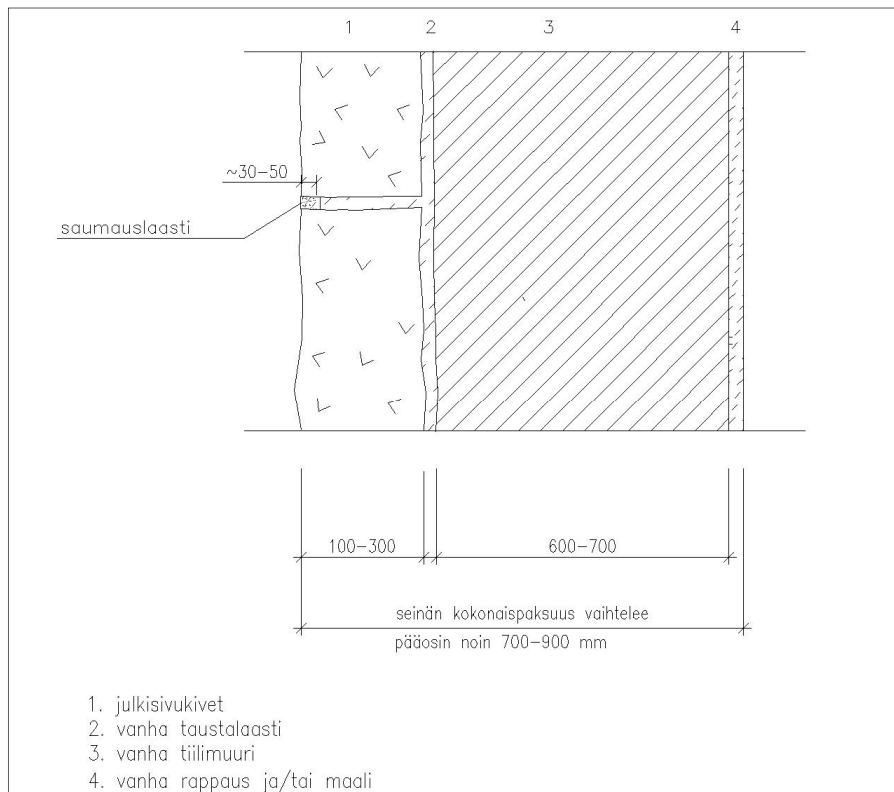
Näihin yleisiin tavoitteisiin päästään, kun käytetään vaurioitumisasteen mukaista korjaustapaa sekä kiinnitetään huomiota laadunvarmistukseen. Oleellista on estää kasvava kosteuskertymä rakenteeseen sekä parantaa yksityiskohtien sadevedenpitävyyttä.

Luonnonkiviverhottujen massiivitiilirakenteiden korjaamiseen on käytössä kevyitä ja raskaita korjausmenetelmiä. Kevyitä menetelmiä ovat pintasaumaus ja syväsaumaus. Raskaana korjausmenetelmänä on käytössä luonnonkiviverhouksen purku ja uudelleenrakentaminen. Lisäksi on muita korjausmenetelmiä, joita ovat luonnonkivien lisäkiinnitys, halkeamien korjaus, kosteusrasitusta alentavat korjaukset sekä liittyvien rakenteiden korjaukset. Seuraavana esitettävät korjaustavat perustuvat Helsingin Kallion kirkossa, Turun taidemuseossa ja Tampereen tuomiokirkossa tehtyihin julkisivukorjauksiin. (17), (18), (19)

2.5.2. Kevyet korjaukset

Pintasaumaus

Pintasaumauksessa uusitaan vain laastisaumojen vaurioitunut pintakerros. Rapautunut ja/tai halkeillut pintakerros poistetaan noin 30–50 mm:n syvyyteen (ehjään laastikerrokseen) saakka. Uusintasaumaukseen käytetään pakkasenkestävää kalkkisementtilaastia. Saumaustyö tehdään kerroksittain ja pintasaumat tiivistetään sullomalla.

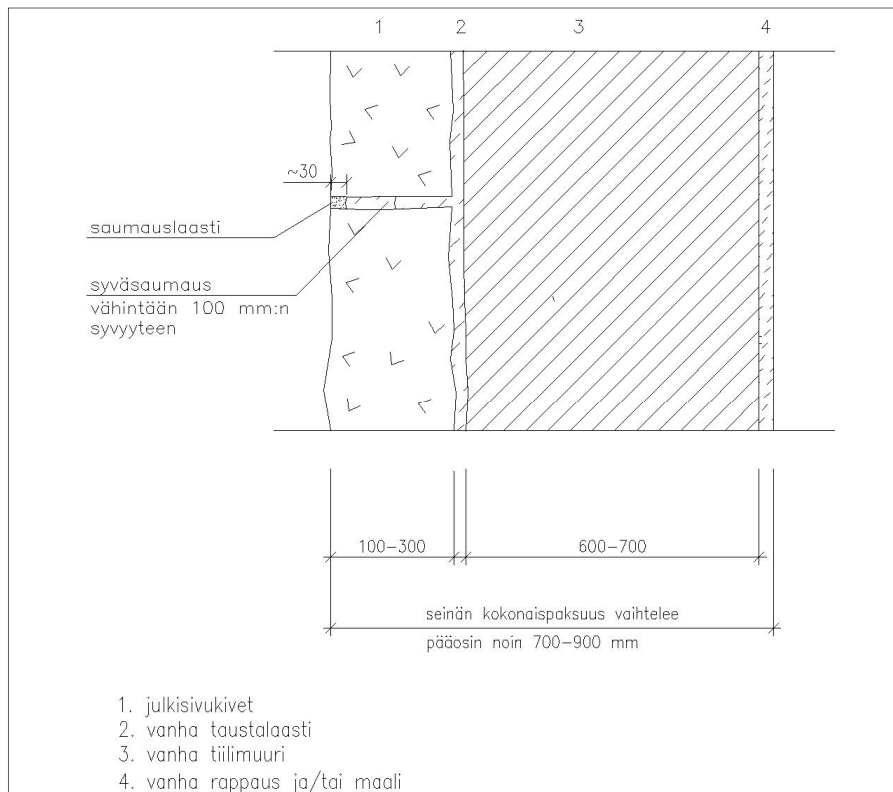


Kuva 2.4 Periaatepiirros, luonnonkivijulkisivun pintasaumaus. (14)

Pintasaumaus soveltuu korjausmenetelmäksi, kun vauriot ovat paikallisia tai kun halutaan hidastaa kosteuden pääsyä rakenteeseen. Menetelmällä voidaan myös siirtää raskasta korjausta myöhempään ajankohtaan. Kuvassa (Kuva 2.4) on esitetty pintasaumaus pääpiirteittäin.

Syväsaumaus

Syväsaumauksessa uusitaan kaikki vaurioitunut, kivimuuria kantava laasti. Uusittavan saumauksen syvyys määritetään laastisauman vaurioitumisasteen mukaan. Työn onnistumiseksi vaurioitunut saumalaasti poistetaan kuitenkin vähintään 100 mm:n syvyyteen saakka. Tarvittaessa kivet kiilataan paikoilleen ruostumattomilla teräskiiloilla ennen saumauksen purkua. Kivien vaakasaumoihin voidaan asentaa tarvittaessa muuraussiteet. Saumaustyö tehdään pakkasenkestävällä kalkkisementtilaastilla. Laasti pursotetaan saumaan esim. syvätäyttöpumpulla ja lopuksi pintasaumat tiivistetään huolellisesti.



Kuva 2.5 Periaatepiirros, luonnonkivijulkisivun syväsaumaus. (14)

Syväsaumaus soveltuu korjausmenetelmäksi julkisivujen vähemmän rasitetuilla osilla, joissa saumalaasti on pitkälle rapautunutta, mutta taustalaasti on pääosin ehjää. Syväsaumausta käytetään myös kohdissa, joissa luonnonkivien irrottaminen ei onnistu niiden suuren painon, muodon tai sijainnin vuoksi. Kuvassa (Kuva 2.5) on esitetty periaatepiirros luonnonkivijulkisivun syväsaumauksesta.

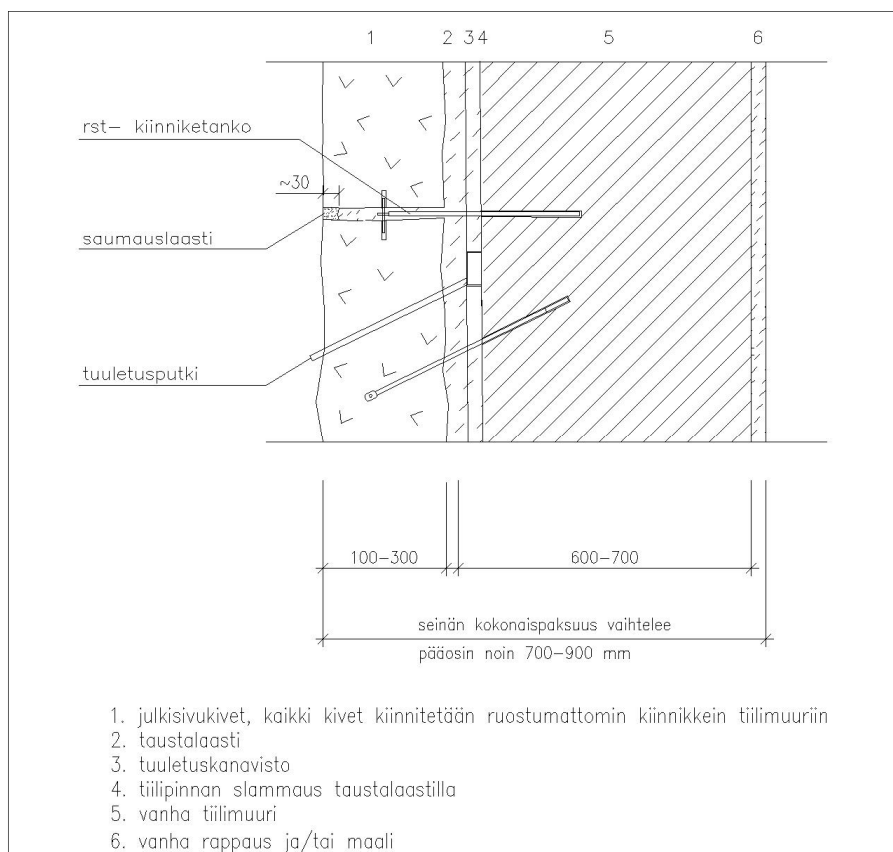
Muut kevyet korjaukset

Luonnonkivien kiinnitystä tiilimuuriin voidaan tarvittaessa parantaa saumauskorjausten yhteydessä. Lisäkiinnitys tehdään kivien läpi pulttaamalla piilokiinnityksenä ns. kivitulppaa käyttäen. Kiinnitysosin käytetään ruostumatonta (ankarissa olosuhteissa haponkestävää) terästä. Ankkureiden riittävä lujuus varmistetaan vetokokeiden avulla. Menetelmää käytetään yleensä suurien kivien lisäkiinnitykseen rakenteen stabiiliuden varmistamiseksi.

Saumauskorjausten yhteydessä korjataan usein myös kivien halkeamia. Julkisivussa kiinni olevien kivien korjaukset tehdään injektoimalla. Halkeaman ulkopintaan tehdään epoksimassan ja kivitauheen seoksesta uusi pinta muotiksi. Tämän jälkeen halkeama injektoidaan säänkestävällä hartsiilla ja injektointikolo viimeistellään. Halkeamakorjausten tarkoituksena on estää kosteuden pääsy halkeamien kautta rakenteeseen.

2.5.3. Raskaat korjaukset

Raskaalla korjausmenetelmällä tarkoitetaan luonnonkiviverhouksen purkua ja uudelleenrakentamista. Menetelmään sisältyy kiviverhouksen sekä vaurioituneen laastikerroksen/tiilimuurauksen purku, seinärakenteen kuivatus, tuuletuskanaviston asennus, luonnonkivien kiinnitys ja takaisinmuuraus. Raskaiden julkisivukorjauksien yhteydessä tehdään myös halkeamakorjauksia. Kuvassa (Kuva 2.6) on esitetty raskaan julkisivukorjauksen pääperiaatteet.



Kuva 2.6 Periaatepiirros, luonnonkivijulkisivun raskas korjaus. (14)

Ennen purkamisen aloittamista kaikki kivet numeroidaan ja niiden sijainti merkitään julkisivuista otettuihin valokuvakopioihin. Kivien numerointi tehdään siten, että kaikilla kivillä on oma yksilöllinen tunnus. Lisäksi kivien sijainti mitataan.

Kiviverhouksen purkaminen tehdään ylhäältä alaspäin. Sitä ennen varmistetaan purkamatta jätettävien kivien paikallaan pysyminen ja tarvittaessa ne ankkuroidaan tiilimuriin.

Purkutyön jälkeen rapautunut laasti ja tiilimuurauksen uloin osa poistetaan mekaanisesti piikkaamalla. Tämän jälkeen tiilimuurin annetaan kuivua.

Puhdistus- ja kuivumisvaiheen jälkeen tiilimuurin ulkopinta slammataan pakkasenkestävällä kalkkisementtilaastilla. Slammattuun tiilipintaan asennetaan tiheästä kuumasinkitystä verkosta tehty tuuletuskanavisto.

Luonnonkivet muurataan paikoilleen pakkasenkestävällä kalkkisementtilaastilla siten, että ulkopintaan jää 30 mm:n saumausvara. Kerralla muurattava osuus on noin 600 mm ja apuna muurauksessa käytetään puukiiloja. Luonnonkivet kiinnitetään tiili-muuriin ruostumattomin teräskiinnikkein. Kiinniketangot kiinnitetään injektointitekniikalla tiilimuuriin ja toinen pää kiinnitetään mekaanisesti luonnonkiveen. Kivien asennuksen yhteydessä asennetaan myös tuuletuskanaviin haponkestävästä teräksestä tehdyt tuuletusputket kuvan (Kuva 2.6) esittämällä tavalla.

Kiinnityksen jälkeen luonnonkiven ja tiilimuurin väli valetaan kerroksittain umpeen. Taustalaastina käytetään samaa pakkasenkestävää kalkkisementtilaastia kuin muuraustyöhön. Lopuksi kiviverhous puhdistetaan ja viimeistellään saumauksella.

Luonnonkiviverhouksen raskaan korjauksen yhteydessä tehdään myös kivien halkeamakorjauksia. Haljenneiden kivien osat tapitetaan ruostumattomilla terästapeilla ja liimataan yhteen. Liimaukseen käytetään sään- ja auringon uv-säteilyn kestäviä kiviliimoja.

Luonnonkiviverhouksen purku ja uudelleenrakennus soveltuu erityisesti julkisivujen rasitetuimpien osien korjausmenetelmäksi. Näissä kohdissa vaurioituminen on usein edennyt niin pitkälle taustalaastiin, että rakenteen stabiilisuus on heikentynyt. Lisäksi tiilimuuriin on yleensä kertynyt huomattavia määriä kosteutta, jonka kuivattaminen onnistuu parhaiten purkamalla luonnonkiviverhous. Koska luonnonkivijulkisivuilta edellytetään usein pitkää käyttöikää, on erityisen tärkeää varmistaa rakenteen kuivumismahdollisuudet jatkossa. Tämä onnistuu ainoastaan purkamalla rakenne ja parantamalla rakenteen kuivumismahdollisuuksia, alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna.

2.5.4. Muita korjauksia

Kaikkiin luonnonkivijulkisivujen korjauksiin kuuluu keskeisenä osana kosteusrasitusta alentavat korjaukset. Rasitustasoa alentamalla varmistetaan julkisivukorjauksen onnistuminen ja pitkä käyttöikä.

Kosteusteknisen toiminnan parantamisessa keskeisiä korjauksia ovat vesikaton tiiviyden parantaminen, vedenpoiston parantaminen, räystäiden ja pellitysten korjaaminen, liittyvien rakenteiden tiivistys sekä muiden yksityiskohtien suunnittelu. Usein joudutaan korjaamaan myös ulkoseinään liittyviä rakenteita, kuten vesikaton puurakenteita.

2.5.5. Korjauksessa huomioitavaa

Korjauksen onnistumiseksi ja asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi, laadunvarmistukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Laadunvarmistuksessa keskeisiä osa-alueita ovat materiaalien kestävyysominaisuuksien testaaminen ennakkokokeilla, materiaalien sopivuuden ja työn onnistumisen varmistaminen mallityöllä sekä työn oikeanlaisen suorituksen varmistaminen työnaikaisin mittauksin ja tarkistuksin. (16)

Tärkein laadunvarmistuskoe on korjauslaastien pakkasenkestävyyden varmistaminen. Laastien pakkasenkestävyys testataan ennakkokokeena ennen työn aloitusta. Laastin pakkasenkestävyyttä seurataan myös työn aikana säännöllisin väliajoin. Työmaalla

säännöllisesti testattavia ominaisuuksia ovat laastien vesi- ja ilmamäärät. Muita mahdollisia materiaalien testauksia ovat teräskiinnikkeiden lujuusominaisuudet ja korroosionkestävyys sekä kemiallisten ankkureiden lujuusominaisuuksien varmistaminen vetokeilla.

Työn oikeanlaista suoritusta seurataan työnaikaisin mittauksin ja tarkistuksin. Työn aikana seurattavia asioita ovat tuuletuskanaviston aukipysyvyys, laastisaumojen tiiviys, erilaiset suojaukset, jälkihoito, kivien ja muiden materiaalien puhdistukset sekä halkeamakorjaukset. Talviolosuhteissa työskenneltäessä tulee työalueen ja rakenteen lämpötilaan kiinnittää huomiota.

2.6. Helsingin rautatieaseman kellotornin korjaus

2.6.1. Yleistä

Esimerkkinä oleva korjauskohde on Helsingin rautatieaseman kellotorni. Kohteen suunnittelusta järjestettiin arkkitehtikilpailu vuonna 1904, jonka voitti Eliel Saarinen kansallisromanttisella suunnitelmallaan. Kilpailun jälkeen suunnitelmaa arvosteltiin, minkä vuoksi lopullisia suunnitelmia muokattiin rationaalisempaan suuntaan. Kohde valmistui vuonna 1919 viidentoista vuoden rakennusurakan jälkeen. (20), (5)

Helsingin rautatieasema on U:n muotoiseksi suunniteltu pääteasema. Rakennus käsittää Rautatien torin varressa olevan päärakennuksen, toimistosiiwet sekä lähes 50 m:n korkeuteen ulottuvan kellotornin. Julkisivut ovat sileäksi hakattua Hangon graniittia. Runkorakenteena toimii tiilimuuraus.

Seuraavissa luvuissa esitellään Helsingin rautatieaseman kellotornin alkuperäinen rakenne, rakenteen vauriot sekä korjausperiaatteet. Esitetyt korjaustavat perustuvat kohteen suunnittelijoilta (14) saatuihin tietoihin.

2.6.2. Alkuperäinen rakenne

Kellotornin ulkoseinärakenteena on luonnonkiviverhottu massiivitiiliseinä. Ulkoseinä käsittää ulkoapäin lukien seuraavat rakennekerrokset: itsensä kantava luonnonkiviverhous, taustalaasti, kantavana rakenteena toimiva massiivitiilimuuraus sekä lämpimällä osalla olevat sisäpinnan rappaus ja maalaus käsittelyt.

Rakenteen kokonaispaksuus vaihtelee alueittain ollen tornin yläosassa 700–900 mm ja alaosassa enimmillään 1800 mm. Luonnonkivien paksuus on 100–300 mm ollen keskimäärin noin 250 mm. Tiilimuurin paksuus on pääosin 2–2,5 kiveä (550–700 mm). Pilasterien ja ikkunoiden kohdalla paksuus poikkeaa hieman muusta rakenteesta.

Luonnonkivet on sidottu tiilimuriin rautaisilla, pääosin $\phi 13$ mm:n kivihailla, joiden päät on taivutettu 90 asteen kulmaan. Hakojen toinen pää on upotettu luonnonkivien keskellä olevaan reikään ja toinen pää on tiilimuurauksessa. Rakenteen sidontaan ei ole käytetty sidekiviä.

Kivisaumoissa on yleisesti jäämiä vanhasta elastisesta saumaussmassasta, joka on peräisin 1970-luvun alussa tehdystä korjauksesta. Vanhat saumaussmassat on kuitenkin

jo poistettu. Vaakasaumoissa on myös paikoin käytetty lyijylevyjä räsitusten tasaamiseen.

2.6.3. Rakenteen vauriot

Rakenteen vauriot ovat seurausta huonosta kosteusteknisestä toiminnasta. Sadevesi pääsee imeytymään rakenteeseen huokoisten laastisaumojen kautta. Kuivuminen on kuitenkin hidasta, sillä saumapinta-alaa on hyvin vähän. 1970-luvun alussa tehty saumakorjaus on myös osaltaan vaikuttanut rakenteen kosteuspitoisuuteen. Tuolloin saumaukseen käytettiin elastista kittiä estämään viistosateen kulkeutumista rakenteeseen. Tiiviin saumausmassan vaikutuksesta rakenteessa ollut kosteus ei kuitenkaan päässyt haihtumaan pois, minkä vuoksi taustarakenteisiin oli kerääntynyt huomattavia kosteuspitoisuuksia.

Alustava arvio rakenteen vaurioitumisesta perustui kuntotutkimukseen, joka toteutettiin käyttämällä silmämääräistä katselmusta sekä laastisaumojen porausta tutkimusmenetelminä. Tämän pohjalta tehtiin korjauspäätös ja alustava arvio korjaustyön laajuudesta. Tarkempi käsitys rakenteen kunnosta (ja korjaustyön laajuudesta) saatiin kuitenkin rakenneavauksista, jotka suoritettiin telineiden pystyttämisen jälkeen.

Kellotornissa suoritetuissa rakenneavauksissa (Kuva 2.7) havaittiin runsaasti pakkasrapautumista. Saumalaasti oli koko tornissa pitkälle rapautunut ja kivien vaakasaumoissa lähes kokonaan rapautunut. Taustalaastin rapautuminen oli edennyt pitkälle räsitetuimmilla julkisivunosilla. Tiilimuurissa havaittiin rapautumia samoilla kohdilla missä taustalaasti oli pitkälle rapautunut.



Kuva 2.7 Esimerkki rakenneavauksien yhteydessä havaituista pakkasvaurioista (14)

Osa rakenneavauksien yhteydessä irrotetuista luonnonkivistä oli sidottu tiilimuriin kivihailla. Suurin osa todetuista kivihaista oli katkennut hakojen taitoskohdasta. Osittain hakojen katkeaminen oli purkutyöstä aiheutuvaa, mutta pääosa murtumista on todennäköisesti syntynyt jo hakojen taivutusvaiheessa. Merkittävää korroosiosta johtuvaa hakojen poikkipinta-alan pienenemistä ei kuitenkaan havaittu.

Rakenneavausten yhteydessä otettiin myös materiaalinäytteitä saumalaastista, taustalaastista sekä tiilimuurista. Saumalaastinäytteiden lyijypitoisuus oli selvästi kohonnut vaakasaumoissa olevien lyijylevyjen vaikutuksesta. Taustalaastinäytteiden lyijypitoisuus oli myös osittain kohonnut. Taustalaastista sekä tiilimuurista otetuista näytteistä havaittiin kivien taustarakenteiden olevan erittäin märkiä. Näytteiden perusteella tiilimuurin ulko-osien kosteuspitoisuudet olivat 15-17 p-% tornin yläosissa ja 7-10 p-% tiilimuurin sisäosissa.

2.6.4. Korjaustavat

Rakenteessa havaittujen vaurioiden laajuudesta johtuen koko kellotorniin tehtiin raskas julkisivukorjaus. Niissä kohdissa, joissa kivien irrottaminen ei onnistunut, korjaustavaksi valittiin syväsaumaus. Kohteessa tehtiin runsaasti muitakin korjauksia, kuten vesikaton ja muiden pellitysten korjaukset, vedenpoistojärjestelmän korjaus ja terassien lattioiden uusiminen. Myös kellotornin ikkunat, terassien ovet sekä kellot kunnostettiin.

Julkisivujen raskas korjaus toteutettiin pääpiirteittäin luvussa 2.5.3 esitetyllä tavalla. Ennen purkutyön aloittamista kivet numeroitiin, merkittiin sekä mitattiin kivien vaakasaumojen korot noin kahden metrin välein. Julkisivujen purku suoritettiin ylhäältä alaspäin. Purkamatta jätettiin terassien sisänurkan kivet sekä joitain nurkkakiviä. Sauma- ja taustalaastien lyijypitoisuudesta johtuen purkutyöstä tullut jäte käsiteltiin ongelmajätteenä. Purkuvaiheen jälkeen tiilimuurin annettiin vielä kuivua, ennen varsinaisen korjausvaiheen aloittamista.

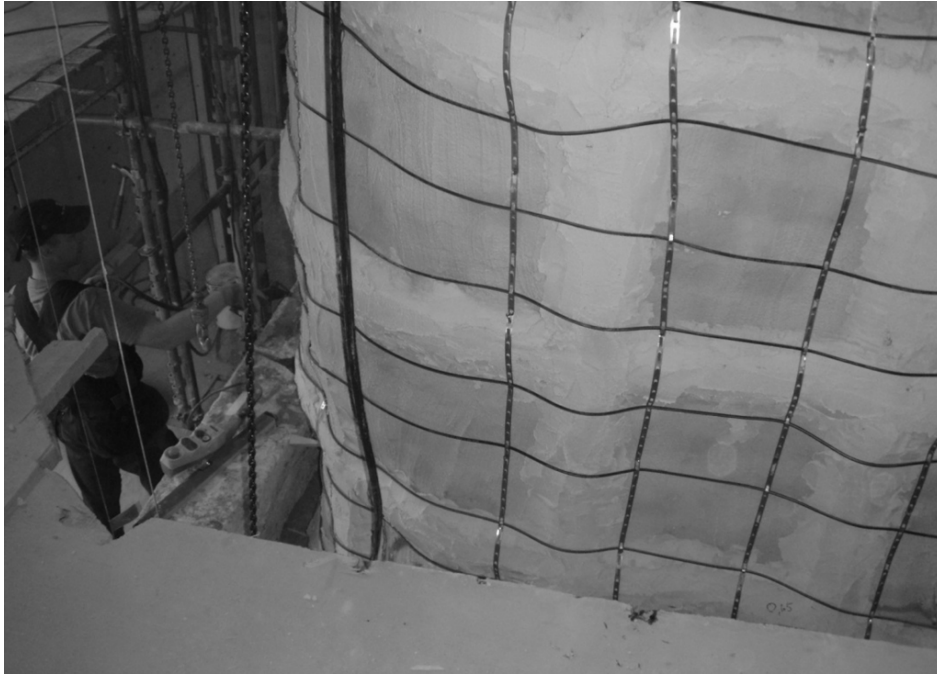
Varsinainen korjaustyö aloitettiin taustarakenteen kunnostuksella. Tiilimuurin ulko-osasta poistettiin rapautunut noin 10-15 cm:n (1/2 kiveä) kerros. Tämän jälkeen tiilimuurin pinta slammattiin.

Taustarakenteen kunnostamisen jälkeen asennettiin tuuletuskanavisto tiilimuurin pinnalle. Kuvassa (Kuva 2.8) näkyy tuuletuskanavistoa paikoilleen asennettuna.



Kuva 2.8 Tuuletuskanavistoa paikoilleen asennettuna (14)

Luvussa 2.5.3 esitetystä korjaustavasta poiketen esimerkkikohteeseen asennettiin termostaateilla ohjattavat lämpövastuskaapelit taustalaastikerrokseen. Kaapelit asennettiin tiilimuurin ja luonnonkiven väliin taustalaastikerrokseen kuvan (Kuva 2.9) osoittamalla tavalla.



Kuva 2.9 Lämmityskaapeleita paikoilleen asennettuna (14)

Lämmityskaapeleiden asennustyön jälkeen luonnonkivet muurattiin takaisin paikoilleen ja taustalaastikerros valettiin kerroksittain umpeen. Kerralla asennettava ja valettava osuus oli pääosin noin 90 cm eli kaksi kivistä. Paikoitellen luonnonkiviä jouduttiin kaventamaan tuuletuskanaviston sekä sähkökaapeleiden tarvitseman tilan vuoksi. Lopuksi luonnonkiviverhous viimeisteltiin saumauksella ja puhdistuksella.

3. RAKENTEEN KOSTEUSPITOISUUDEN SEURANTA

3.1. Yleistä

Rakenteiden kosteuspitoisuutta voidaan seurata useilla eri menetelmillä riippuen tarkasteltavasta rakenteesta sekä tutkimusongelmasta. Menetelmät voidaan karkeasti jakaa absoluuttisen kosteuden mittaamiseen ja suhteellisen kosteuden mittaamiseen. Lisäksi on olemassa erilaisia subjektiivisia menetelmiä, jotka eivät anna kovin luotettavia tuloksia.

Kuivatus-punnitusmenetelmässä rakenteesta irrotettua kosteaa näytettä kuivataan 105 °C:ssa, kunnes sen massa ei enää muutu. Kosteuspitoisuus saadaan painoprosentteina, kun näytteestä kuivauksessa haihtuneen veden massaa verrataan kuivana punnitun näytteen massaan. Kuivapunnituskokeella saadaan määritettyä rakenteen absoluuttinen kosteuspitoisuus ja menetelmää voidaan pitää tarkkana. Mahdollisia virheitä voi syntyä työmaalla näytteenoton yhteydessä, jos näytteenottoa on ollut liian kauan avoinna. Myös näytteiden säilytyksessä sekä punnituksessa voi syntyä virhettä. Lisäksi ongelmia voi aiheuttaa kosteusarvojen muuttaminen painoprosenteista suhteelliseksi kosteudeksi. (21), (22), (23)

Pintakosteudenmittaamisessa rakenteen pintaan painetaan anturi, joka mittaa materiaalin dielektrisiä ominaisuuksia. Laitteeseen ohjelmoitu kaava muuttaa dielektrisyyden absoluuttiseksi kosteudeksi. Menetelmä on nopea sekä yksinkertainen, mutta varsin epätarkka ja häiriöaltis. (21), (22), (23)

Porareikämittaus on hyvin yleinen suhteellisen kosteuden mittaamismenetelmä. Mittaus tehdään rakenteeseen poratuista rei'istä kapasitiivisella kosteudenmittausanturilla. Mittapisteet tiivistetään ja tulpataan ennen mittauksen suorittamista. Mittauksen suorittaminen vaatii erityistä ammattitaitoa, sillä menetelmä on hyvin häiriöaltis. (21), (22), (23)

Porareikämittaus perinteisillä RH-antureilla soveltuu suhteellisen kosteuden mittaamiseen, kun rakenteen kosteus ei ole kapillaarisella alueella. Korkeiden kosteuksien mittaamiseen tulisi käyttää sähköjohtavuuteen perustuvia antureita.

3.2. Mittausmenetelmät

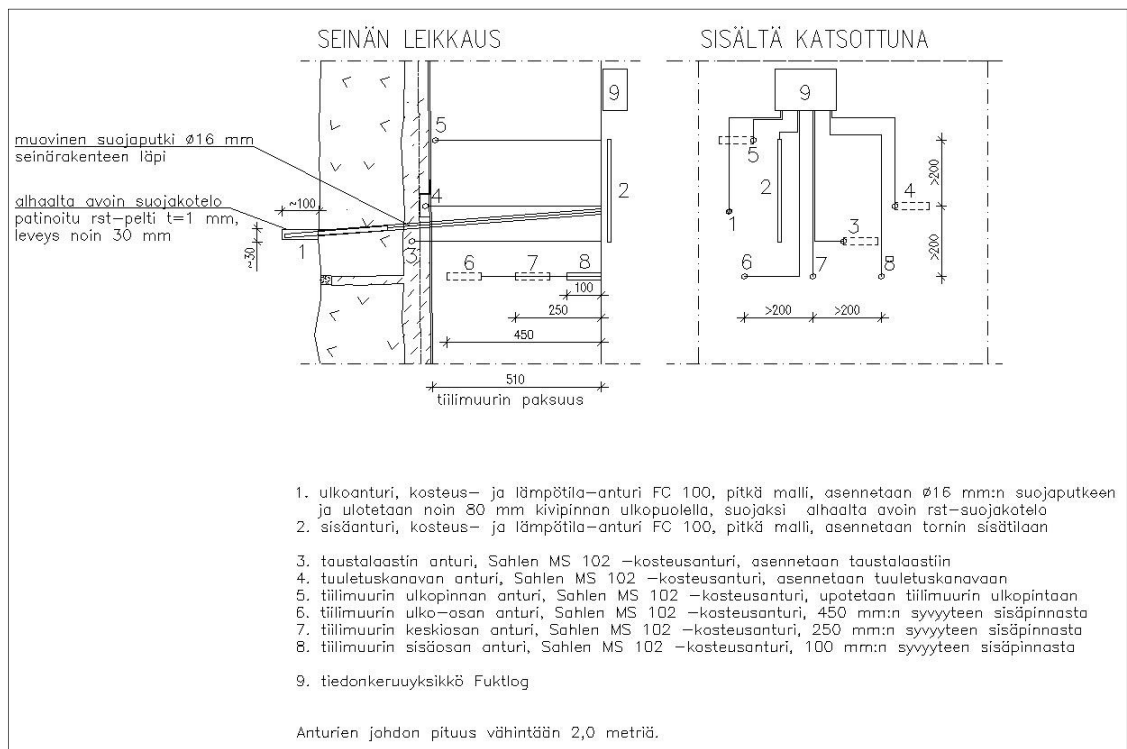
Kosteuspitoisuuden seurantamittauksella saadaan tietoa rakenteen kosteustilan kehittymisestä. Tarkoituksena on arvioida korjauksen onnistumista mittaustulosten avulla ja seurata pidemmällä aikavälillä kosteustilan kehittymistä.

Helsingin rautatieaseman kellotornin ulkoseinärakenteen kosteuspitoisuuden pitkäaikaisseurantaan valittiin ruotsalaisen FuktCom AB nimisen yrityksen valmistama mittaustaliteisto, joka asennettiin rakenteeseen korjauksen yhteydessä. Valintaan vaikuttivat mm. laitteiston pitkäikäisyys sekä soveltuvuus korkeiden kosteuksien mittaamiseen.

3.2.1. Mittauslaitteiston rakenne

Laitteisto koostuu mittaustantureista (MS 102, FC 100) sekä tiedonkeruuyksiköstä (Fuktlog). Anturit mittaavat huokosilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa. Mittauspisteitä on yhteensä viisi eri puolilla kellotornia. Itäjulkisivulla sijaitsevat mittauspisteet 1 ja 3, mittauspiste 4 sijaitsee eteläjulkisivulla, mittauspiste 5 sijoittuu länsijulkisivulle ja mittauspiste 2 on pohjoisjulkisivulla. Mittauspiste 1 poikkeaa muista sijainniltaan, sillä se sijaitsee tornin lämpimässä alaosassa. Muut mittauspisteet sijaitsevat kylmällä alueella tornin keskiosassa.

Jokainen mittauspiste sisältää kuusi taustalaastiin tai tiilimuriin asennettua MS 102 anturia, kaksi ulko- ja sisäilman olosuhteiden mittaamiseen tarkoitettua FC 100 anturia sekä tiedonkeruuyksikön. Anturit on sijoitettu siten, että rakenteeseen muodostuu yhtenäinen mittalinja ulkoilmasta sisäilmaan. Mittauspisteiden kosteusmittaustanturien sijoittelun pääperiaatteet on esitetty kuvassa (Kuva 3.1). (14)



Kuva 3.1 Kosteusmittaustanturien sijoittelu eräässä tornin mittauspisteessä. (14)

Mittauspisteiden 3 ja 5 (tornin länsi- ja itäsivut) antureiden sijoittelu poikkeaa hie-
man yllä esitetyn kuvan periaatteesta. Näissä mittauspisteissä sisäilman olosuhteita mit-
taava anturi on sijoitettu tuuletuskanavistoon. Sisäilman vertailuolosuhteet saadaan sa-

mallalla korkeudella tornissa sijaitsevista toisista mittauspisteistä. Näin saadaan tietoa myös tuuletuskanaviston olosuhteista. (14)

Loggeri

Antureiden mittaustulosten monitorointi tapahtuu tiedonkerääjän Fuktlog (Kuva 3.2) avulla. Loggerissa on tilaa kahdeksalle anturille, joissa kussakin on kaksi kanavaa lämpötilan- ja suhteellisen kosteuden mittaamista varten (eli yhteensä 16 kanavaa).

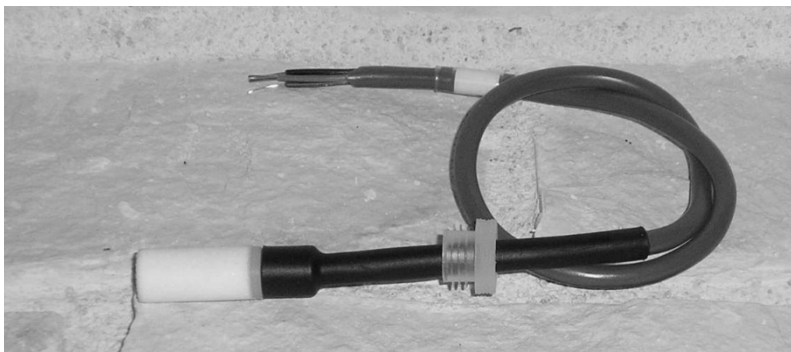


Kuva 3.2 Tiedonkeruuyksikkö Fuktlog (24)

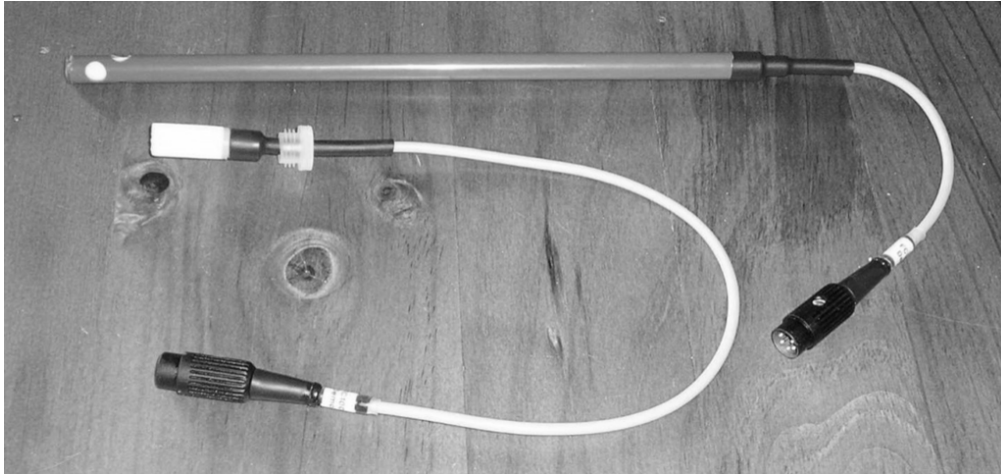
Tiedonsiirto tiedonkeruuyksiköstä tapahtuu langattomasti GSM yhteyden avulla ja tietokoneelle asennetun FuktLog- mittausohjelman avulla. (25), (24)

Anturit

Anturin MS 102 (Kuva 3.3) sisällä on pieni puupala, jonka kosteuspitoisuutta mitataan. Lämpötilan mittaamista varten anturissa on termopari. Anturin päässä, puupalan ympärillä, on vesihöyryä läpäisevä suojakuori. Mitta-alueet anturilla ovat 64–100 RH % ja lämpötila $-20\ldots 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. (25), (24)



Kuva 3.3 Sahlenanturi MS 102 (24)



Kuva 3.4 Kosteus- ja lämpötila-anturi FC 100 (24)

Anturin FC 100 (Kuva 3.4) toiminta perustuu kapasitiiviseen suhteellisen kosteuden mittaamiseen. Lämpötilan mittaaminen tapahtuu termistorin avulla. Mitta-alueet anturilla ovat RH 0-100 ja T $-20 \dots 80$ °C. (25), (24)

3.2.2. Mittauslaitteiston toiminta

Kosteuspitoisuuden arviointi perustuu huokosilman suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden väliseen tunnettuun yhteyteen. Kun tunnetaan mitattavan materiaalin hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä (luku 4.4.2), voidaan määrittää kosteuspitoisuus sen avulla. Ongelmia syntyy, kun materiaalin kosteuspitoisuus kohoaa kapillaariselle alueelle. Tällöin perinteistä RH-mittaustekniikkaa ei voida enää soveltaa. (14)

Loggeri

Mittauksien lukeminen tapahtuu dataloggerien avulla. Laitteeseen on ohjelmoitu laskentakaava, joka muuttaa puupalan absoluuttisen kosteuden suhteelliseksi kosteudeksi. Absoluuttisen- ja suhteellisen kosteuden välinen yhteys perustuu mitattavan materiaalin (eli puun) tasapainokosteuskäyrän tuntemiseen. (25), (24)

Anturit

Anturin MS 102 toiminta perustuu puun vastusmittaukseen. Anturissa olevat elektrodit mittaavat sähkövastuksen anturin sisältämästä puupalasta, joka asettuu samaan kosteustasapainoon ympäröivän rakenteen kanssa. Absoluuttinen kosteus saadaan, kun tunnetaan puun sähkövastuksen riippuvuus vesipitoisuudesta. (25), (24)

4. KOSTEUSTEKNISEN TARKASTELUN LÄHTÖKOHDAT

4.1. Kosteusteknisen tarkastelun vaiheet

Kosteusteknisen korjaussuunnittelun tavoitteena on suunnitella rakenteen korjaus siten, että kosteuden aiheuttamat vauriot ja haitat voidaan estää (ks. luku 2.5). Kosteusteknisen tarkastelun pääperiaatteita ovat:

- kaikkien kosteuslähteiden ja olosuhdetekijöiden arviointi
- kosteuden siirtymis- ja sitoutumismuotojen arviointi
- rakenteeseen päässeeseen kosteusmäärän vaikutusten ja haitallisuuden arviointi
- rakenteeseen päässeeseen tasapainokosteuden ylittävän kosteuden ulospääsyn ja kuivumisen varmistaminen
- rakenteen liitosten ja yksityiskohtien kosteusteknisen toimivuuden arviointi

Kosteustekniset tarkastelut voidaan tehdä kolmella eri tavalla, riippuen rakenteen vaurioherkkyydestä ja vaatimustasosta. Tarkimmassa menettelyssä kosteustekniset tarkastelut tehdään yksityiskohtaisien laskelmien avulla. Toinen menetelmä on laadullinen arviointi, joka tehdään käyttäen yksinkertaisia apuvälineitä, kuten diagrammit, taulukot, normit sekä yksinkertaiset laskelmat. Kolmantena vaihtoehtona on käyttää hyvin toimiviksi osoitettuja tyyppiratkaisuja. (7)

Tarkka laskennallinen mitoitus tehdään yleensä tietokoneohjelmilla. Tietokonepohjainen suunnittelu etenee vaiheittain seuraavanlaisesti:

- 1) Tarkasteltavan rakenteen valinta
- 2) Laskentaohjelman valinta
- 3) Materiaaliominaisuuksien valinta
- 4) Sisä- ja ulkopuolen referenssiolosuhteiden valinta
- 5) Rakenteen toimintakriteerien ja raja-arvojen valinta
- 6) Laskentamallin teko ja simulointi

Laskennan tuloksena saatetaan referenssiolosuhteita ja/tai raja-arvoja joutua vaihtamaan. Tulosten suuruusluokkien oikeellisuus voidaan tarkistaa yksinkertaisien käsilaskelmien avulla. (26)

4.2. Lämpö

Lämpötilat vaikuttavat merkittävästi luonnonkivijulkisivujen kosteustekniseen toimintaan. Lämpö vaikuttaa esimerkiksi kosteuden siirtymiseen ja tiivistymiseen rakenteessa.

Toisaalta rakenteen kostuessa, sen lämmöneristyskyky heikkenee. Tästä syystä lämpötila- ja kosteustarkastelu tulisi tehdä aina samanaikaisesti.

4.2.1. Määritelmiä

Lämpö on aineen molekyylien liike-energiaa, joka kasvaa lämpötilan noustessa. Kaasuissa molekyylit liikkuvat ja törmäävät toisiin molekyyliin. Lämpötilan noustessa molekyylien nopeudet kasvavat. Nesteissä molekyylien liike on rajoitetumpaa, mutta myös lämpötilasta riippuvaa, kuten kaasuissa. Kiinteissä aineissa lämpö on atomien värähtelyä, joka siirtyy aaltoliikkeenä ja johteissa lisäksi vapaiden elektronien liikkeenä. (26)

4.2.2. Lämmön siirtymismuodot

Lämpö pyrkii siirtymään korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämpötilaerojen tasoittuminen voi tapahtua kolmella eri tavalla: johtumalla, konvektion avulla tai säteilemällä.

Lämpöenergia siirtyy johtumalla materiaalin molekyyliissä tapahtuvan sisäisen värähtelyn vaikutuksesta. Lämpö pyrkii aina tasoittumaan eli siirtymään korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Tasoittumisnopeus eli lämpövirta voidaan ilmaista kaavalla:

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (4.1)$$

missä

λ = materiaalin lämmönjohtavuus (W/mK)

d = materiaalin paksuus (m)

$T_1 - T_2$ = lämpötilaero

Suhdetta d/λ kutsutaan materiaalin lämmönvastukseksi R . Jos rakenne koostuu useista ainekerroksista, saadaan lämpövirta lämmönvastusten ja pintavastusten summana kaavalla:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\Sigma R} \quad (4.2)$$

missä

$\Sigma R = R_{si} + \Sigma R_n + R_{se}$ = rakenteen lämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

R_n = materiaalin lämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

R_{si} = sisäpinnan pintavastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

R_{se} = ulkopinnan pintavastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

Rakenteen pintavastukset saadaan laskettua kaavalla:

$$R_s = \frac{1}{\alpha_{rad} + \alpha_{conv}} \quad (4.3)$$

missä

α_{conv} = pinnan konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

α_{rad} = säteilyn lämmönsiirtymiskerroin ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

Pintavastusten arvoihin vaikuttavat säteilyn ja konvektion suuruudet. Yleensä laskelmissa voidaan kuitenkin käyttää karkeita arvoja. (27), (26)

Lämpö siirtyy konvektiolla materiaalin tai rakenteen läpi virtaavan ilman mukana. Konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista riippuen virtaavan ilman luonteesta. Pakotetussa konvektiossa ilmavirran aikaansaa jokin ulkopuolinen voima, kuten tuuli tai ilmanvaihto. Luonnollista konvektiota aiheuttavat rakenteen lämpötilaerot. (27), (26)

Lämpöenergiaa siirtyy säteilemällä sähkömagneettisen aaltoliikkeen avulla kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, lähettävät eli emittoivat säteilyä. Kun säteily osuu johonkin pintaan, osa siitä heijastuu takaisin ja osa absorboituu. Pintojen emittoiva lämpösäteily riippuu materiaalista sekä pintakäsittelystä. Eniten lämpösäteilyä emittoi ns. musta kappale. (27), (26)

4.3. Kosteus

Luonnonkiviverhoiltuun massiivitiilirakenteeseen vaikuttavia pääasiallisia kosteusrasituksen lähteitä ovat viistosade sekä vuotovedet. Muita kosteuslähteitä ovat ilman kosteus, korjaamisesta tullut vesi sekä maaperän kosteus. Kosteuslähteiden lisäksi rakenteen kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat erilaiset olosuhdetekijät, joita ovat tuuli, lämpötilat, auringon säteily, painovoima sekä paine-erot.

4.3.1. Sade

Sade voi tulla lumena, vetenä tai jäänä. Luonnonkivijulkisivujen kannalta merkittävin sateen muoto on viistosade. Viistosateeksi kutsutaan sateen vaakasuoraa komponenttia, joka johtuu tuulen vaikutuksesta sateeseen.

Seinäpinnalle tuleva viistosade riippuu pystysuoran sateen määrästä ja tuulen nopeudesta. Viistosateen määrä voidaan laskea esimerkiksi seuraavan kaavan avulla (26):

$$W_{wdr} = 0,222 \cdot r \cdot W_h^{0,88} \quad (4.4)$$

missä

W_{wdr} = viistosade seinäpinnalle ($\text{mm}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$)

W_h = sademäärä vaakapinnalle ($\text{mm}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$)

r = tuulen nopeus (m/s)

Viistosateen määrään vaikuttaa rakennuksen maantieteellinen sijainti, koko ja muoto sekä vallitsevat tuuliolosuhteet. Viistosade rasittaa eniten rannikkoseudun korkeita rakennuksia, kuten esimerkikohteena olevaa Helsingin rautatieaseman kellotornia. Suu-

rimmillaan viistosade on etelä-länsi suunnan julkisivuilla. Myös vuodenaika vaikuttaa sateen määrään siten, että suurimmillaan viistosaderasitus on syksyisin. (7), (27)

Julkisivun muotoilu sekä pintamateriaalin vedenimukyky vaikuttavat viistosateen käyttäytymiseen julkisivupinnalla. Tässä suhteessa huokoiset ja tiiviit materiaalit poikkeavat suuresti toisistaan (huokoisuuden vaikutusta vedenimukykyyn on käsitelty luvussa 2.3). Koska luonnonkivi on tiivis materiaali, muodostuu siihen heti sateen alkuvaiheessa alaspäin valuva vesikalvo. Pinnan karheudesta riippuen vesikalvo voi olla yhtenäinen tai se voi muodostaa ”uomia” luonnonkivien syvänteisiin. Tämä vesikalvo siirtyy alas, ylös ja sivullepäin tuulen vaikutuksesta ja tasaantuu yhtenäiseksi vesipinnaksi laastisaumojen kohdalle. Tästä johtuen laastisaumoihin kohdistuva kosteusrasitus on normaalia viistosadetta huomattavasti suurempi. Vapaasta vedenpinnasta kosteus imeytyy kapillaarisesti laastin ja tiilien huokosverkostoon. (7), (27), (5)

Puutteellisen sadevesien poisjohtamisen vuoksi luonnonkivijulkisivuissa voi esiintyä suuria paikallisia kosteuskertymiä. Sadevesi voi päästä seinärakenteeseen esimerkiksi räystäs-, ikkuna- ja muiden pellitysten vaurioiden kautta. Myös liian lyhyet syöksytorvet ja ulosheittäjät mahdollistavat sadeveden pääsyn rakenteeseen.

4.3.2. Ilman kosteus

Kostea ilma koostuu kahdesta kaasusta, kuivasta ilmasta (typeä 78 %, happea 21 % ja argonia 1 %) ja vesihöyrystä. Koska ilma sisältää aina jonkin verran kosteutta, on ilman kosteus otettava huomioon kosteusteknisessä suunnittelussa. (7), (27) Luonnonkivijulkisivut ovat kosketuksissa ympäröivän ulko-, sisä- ja huokosilman kanssa.

Ilma voidaan olettaa ideaalikaasuksi, jolloin tietyssä paineessa ja lämpötilassa oleva kaasutilavuus sisältää aina yhtä monta molekyyliä. Ilmamolekyylit ovat painavampia kuin vesimolekyylit, joten ilma kevenee vesihöyrypitoisuuden lisääntyessä. (7), (27)

Tietyssä lämpötilassa oleva ilma voi sisältää enintään tietyn määrän vesihöyryä. Tätä vesihöyrymäärää kutsutaan kyllästyskosteuspitoisuudeksi. Mitä korkeampi lämpötila on, sitä suurempi on kyllästyskosteuspitoisuus. (7), (27)

Ilmassa olevan vesihöyryn määrä voidaan ilmaista joko absoluuttisena kosteutena (kg/m^3) tai suhteellisena kosteutena (RH). Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan tietyssä lämpötilassa olevan kosteusmäärän suhdetta kyllästyskosteuspitoisuuteen

$$\varphi = v/v_{\text{sat}} \quad (4.5)$$

joka ilmaistaan yleensä prosentteina. Vaihtoehtoisesti suhteellinen kosteus voidaan myös esittää vesihöyryn osapaineiden avulla. (7), (27)

Ulkoilman kosteus

Ulkoilman suhteellinen kosteus vaihtelee vuodenajan mukaan ollen suurimmillaan talvella (noin 90 % RH) ja pienimmillään kesällä (noin 65–75 % RH). Ilman absoluuttinen kosteuspitoisuus on kuitenkin suurimmillaan kesäisin. Eri paikkakuntien välillä suhteel-

lisen kosteuden arvot ovat lähellä toisiaan. Rannikkoseudulla suhteellinen kosteus on kuitenkin hieman suurempi kuin sisämaassa. (7), (27)

Sisäilman kosteus

Sisäilman kosteuteen vaikuttavat mm. ulkoilman kosteuspitoisuus, kosteustuotto rakennuksen sisällä, ilmanvaihdon suuruus, rakennusaineiden kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta sekä rakenteen kuivuessa sisäilmaan vapautuvan kosteuden määrä. Sisäilman kosteus voidaan määrittää seuraavasti:

$$v_i = v_e + \frac{G}{n \cdot V} \quad (4.6)$$

missä

v_i = sisäilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

v_e = ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

G = kosteuden tuotto sisällä (kg/h)

n = ilman vaihtuvuus aikayksikössä (1/h)

V = tarkasteltavan tilan tilavuus (m³)

Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että kosteustuotto on suurempaa asuinrakennuksissa kuin toimistorakennuksissa. Teollisuusrakennuksissa kosteuden tuotto voi olla huomattavaa, teollisuuden alasta riippuen. (7), (27)

Luonnonkiviverhotut rakennukset ovat usein arvorakennuksia, joissa kosteuden tuotto sisäilmaan on vähäistä. Sisäilman kosteutta kuitenkin lisää rakenteen kuivuminen sisäänpäin ja puutteellinen ilmanvaihto.

4.3.3. Maaperän kosteus

Kosteus voi esiintyä maaperässä pintavetenä, vajovetenä, pohjavetenä, kapillaarivetenä tai maan huokosissa olevana vesihöyryinä. Pintavettä ovat maata pitkin tai katolta maaperään valuva sadevesi. Osa tästä imeytyy vajovetenä maaperään. Pohjavedellä tarkoitetaan maahuokoset täyttävää vettä, joka virtaa sivusuunnassa paine-erojen vaikutuksesta. Pohjavedenpinnan yläpuolella sijaitsee kerros, jossa on kapillaarisesti imeytyynyttä vettä. Maahuokosissa oleva vesi on vajovedestä ja kapillaarivedestä huokosiin tullutta vettä. Kosteusteknisissä tarkasteluissa maahuokosten suhteellisen kosteuden oletetaan olevan 100 % RH. (27), (7)

Maaperän kosteus rasittaa lähinnä sellaisia luonnonkivirakennuksia, joissa on kellaritilat. Näissä tapauksissa kosteus voi siirtyä diffuusion avulla kellarin lattian läpi maaperän lämpenemisen johdosta. Vaikutus luonnonkiviverhottuihin ulkoseiniin rajoittuu seinien alaosiin, joissa kapillaarinen kosteuden siirtyminen maaperästä on mahdollista.

4.3.4. Rakennuskosteus

Rakennuskosteudella tarkoitetaan rakennusaineiden valmistuksen, varastoinnin, kuljetuksen ja rakentamisen (tai korjauksen) yhteydessä rakenteeseen pääsystä kosteutta. Rakennuskosteutta poistuu niin paljon, että rakenne saavuttaa tasapainokosteuden ympäristön kanssa. Tämä voidaan ilmaista seuraavasti:

$$w_{rak.kost} = w_0 - w_{\infty} \quad (4.7)$$

missä

w_0 = rakentamisvaiheessa rakenteessa oleva vesimäärä (kg/m^3)

w_{∞} = tasapainokosteus ympäristön kanssa käyttöolosuhteissa (kg/m^3)

Rakennuskosteutta voidaan arvioida esimerkiksi taulukon (Taulukko 4.1) avulla, jossa on esitetty suuntaa antavia arvoja joidenkin rakennusmateriaalien rakennuskosteuksista. Arvot pätevät, kun rakennetta ympäröivän ilman suhteellinen kosteus on noin 50 % RH. (7), (27)

Taulukko 4.1 Muutamien rakennusaineiden rakennuskosteuksia. (7)

Aine tai rakenne	Kosteus rakennusvaiheessa w_0 (kg/m^3)	Aineeseen kemiallisesti sitoutuva kosteus (kg/m^3)	Hygroskooppinen kosteus w_{∞} , kun RH=50 % (kg/m^3)	Poistuva kosteus $w_{rak.kost.}$ (kg/m^3)
Kalkkilaasti	300	– 30	10	320
Kalkkisementtilaasti	300	20	30	250
Tiili	10	-	10	0
Tiilimuuri	80	-	10	70

Luonnonkiviverhoiltuun massiivitiilirakenteeseen rakennuskosteutta pääsee lähinnä korjauksen yhteydessä laastissa olevasta ylimääräisestä vedestä, joka ei kulu hydratointireaktioon.

4.4. Kosteuden sitoutuminen

Kosteus sitoutuu luonnonkivijulkisivujen huokoisiin materiaaleihin (poltetut tiilet, laasti), joiden huokosrakenteessa on vapaata huokostilaa. Kosteus voi sitoutua huokoiseen materiaaliin joko vapaasta vedenpinnasta tai vesihöyrynä ilmasta. Huokosrakenteen koko, muoto ja jakauma vaikuttavat materiaalin kosteusteknisiin ominaisuuksiin. Materiaalien ominaisuuksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 2.2.

4.4.1. Kosteuden sitoutumismuodot

Materiaaliin sitoutunut kosteus voi olla kaasuna, nesteinä tai kiinteässä muodossa. Vesi voi sitoutua rakenteisiin joko kemiallisesti tai fysikaalisesti. Kemiallisesti sitoutunut vesi on kiinteä osa aineen rakennetta eikä se liiku. Fysikaalisesti sitoutunutta vettä ovat

adsorptiovesi, kapillaarivesi, vesihöyry aineen huokosissa sekä osmoottisesti sitoutunut vesi. (26), (7)

Adsorptiovedellä tarkoitetaan pintavoimien välityksellä huokosseinämiin kiinnittyneitä vesimolekyylejä. Aluksi vesimolekyylit kiinnittyvät yksimolekyyllisinä kerroksina (monomolekylaarinen adsorptio). Huokosilman suhteellisen kosteuden kasvaessa vesimolekyylikerrokset pinnoilla kasvavat (polymolekylaarinen adsorptio), jolloin vesi käyttäytyy vapaammin ja syntyy kapillaarikondenssi. Pienet huokoset (alle 0,1 μm) täyttyvät jo adsorptiovedellä. Adsorptiohuokosiin sitoutuneen veden määrä riippuu pääasiassa suhteellisesta kosteudesta, huokosverkoston ominaispinta-alasta sekä aineen kemiallisesta luonteesta. (26), (7)

Kapillaarivedellä tarkoitetaan kapillaarivoimien (veden pintajännitys, koheesio ja adheesio) vaikutuksesta huokosverkostoon imeytynyttä vapaata vettä. Pieniin huokosiin vesi imeytyy hitaasti mutta suurella imuvoimalla, suuriin huokosiin vesi imeytyy nopeasti mutta pienellä imuvoimalla. Kapillaarihuokosten huokoskoko on 0,1-10 μm .

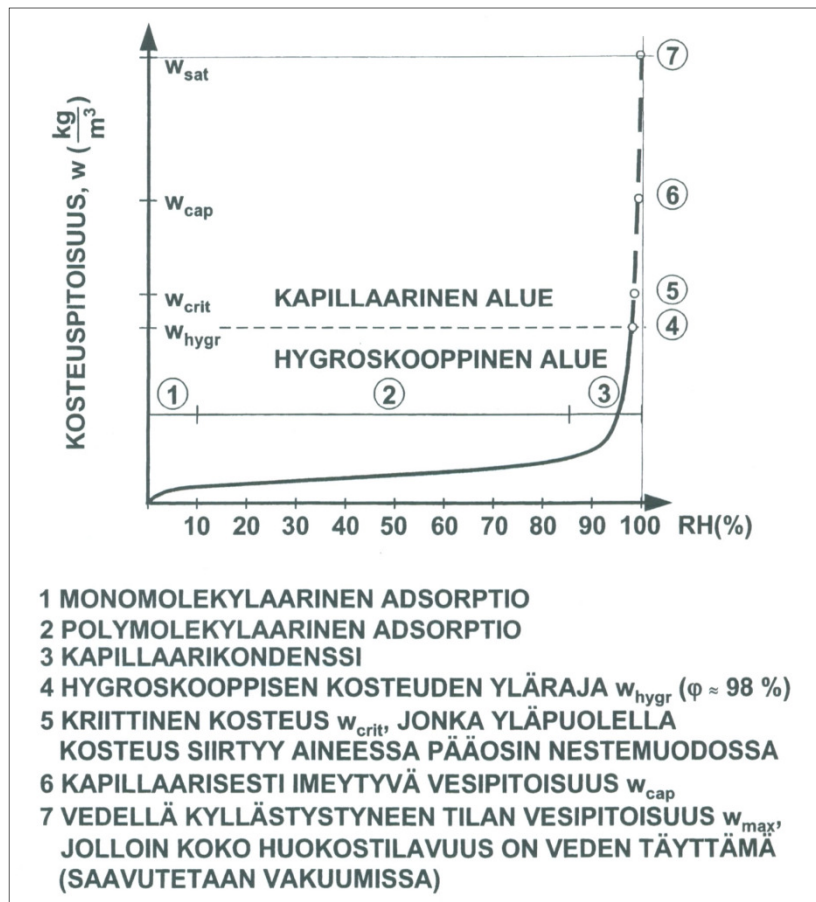
Suuriin huokosiin (yli 10 μm) vesi ei imeydy enää kapillaarisesti, vaan ne voivat täyttyä gravitaation ja paine-erojen vaikutuksesta. Tällaisia huokosia kutsutaan gravitaatiohuokosiksi. (26), (7)

Kosteus voi olla myös vesihöyrynä aineen huokosilmassa. Vesihöyryn määrä riippuu aineen huokoisuudesta, suhteellisesta kosteudesta sekä lämpötilasta. Vesihöyry ei ole sitoutunut, vaan liikkuu diffuusiolla alemman kosteuspitoisuuden suuntaan. (26), (7)

4.4.2. Tasapainokosteus

Materiaalin ja ympäristön välillä vallitsee aina joko kostuminen, kuivuminen tai tasapainotila. Materiaalin tasapainokosteus on erilainen riippuen siitä, lähestyykö kosteuspitoisuus tasapainotilaa kuivemmasta vai kosteammasta suunnasta, eli onko kyseessä adsorptio vai desorptio. (26), (7)

Tasapainokosteudella tarkoitetaan sitä kosteutta, minkä aine saavuttaa, kun se asetetaan tiettyihin olosuhteisiin. Hygroskooppiseksi tasapainokosteudeksi sanotaan sitä kosteutta, jonka aine sitoo itseensä ilmasta. Tämä on riippuvainen mm. ilman suhteellisesta kosteudesta sekä lämpötilasta. Kapillaarisella tasapainokosteudella tarkoitetaan kapillaarisesti imeytyvää vesipitoisuutta. Tasapainokosteuskäyrän periaatekuva on esitetty kuvassa (Kuva 4.1). Materiaaleille voidaan esittää myös kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä, jossa vaakakselilla on suhteellisen kosteuden tilalta huokosalipaine. Tällä tavoin saadaan esitettyä yksityiskohtaisemmin materiaalien kosteuspitoisuuden muuttuminen kapillaarisella alueella, joka vastaa tavanomaisessa tasapainokosteuskäyrässä suhteellisen kosteuden aluetta 98-100 % RH. (26), (7)



Kuva 4.1 Periaatekuva materiaalin tasapainokosteuskäyrästä. (26)

Eri materiaaleilla tasapainokosteuskäyrät poikkeavat toisistaan riippuen materiaalin huokosrakenteesta ja -jakaumasta. Paljon pieniä huokosia sisältäviä materiaaleja (kuten betoni) kutsutaan hygroskooppisiksi. Niihin kosteus sitoutuu pääosin adsorptiovoimien välityksellä. Paljon kapillaarihuokosia sisältävät materiaalit (kuten poltetut tiilet) sitovat kosteutta pääosin vapaasta vedestä ja niitä kutsutaan ei-hygroskooppisiksi. Kaikki huokosia sisältävät materiaalit ovat kuitenkin jossain määrin hygroskooppisia. (26), (7)

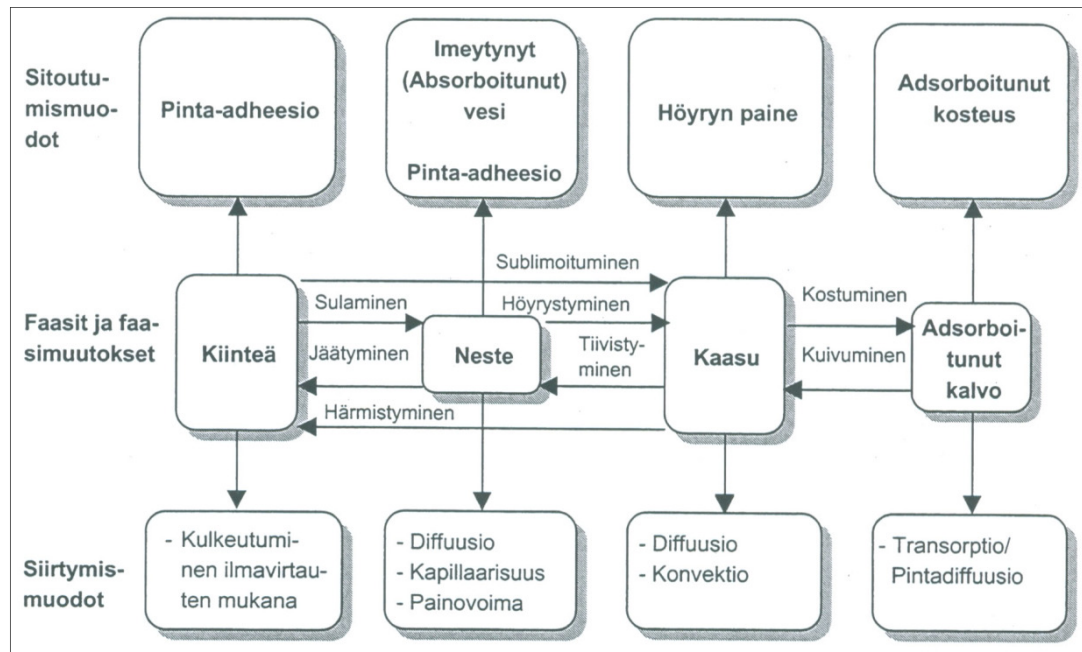
Kapillaarinen kosteus poistuu kapillaarisen siirtymisen ja diffuusion avulla, kun ympäröivän ilman suhteellista kosteutta alennetaan. Hygroskooppisen kosteuden poistuminen materiaalista tapahtuu diffuusion tai konvektion avulla. (26), (7)

4.5. Kosteuden siirtymismuodot

Kosteuden siirtyminen rakenteissa on usein monien tekijöiden summa ja tapahtuu useiden samanaikaisten ilmiöiden vaikutuksesta. Kosteuden merkittävimmät siirtymis- ja sitoutumismuodot sekä faasimuutokset on esitetty kuvassa (Kuva 4.2). Muita siirtymismuotoja ovat mm. termodiffuusio, liukenemalla tapahtuva diffuusio, effuusio, osmoosi sekä elektroninen siirtyminen. (7), (26)

Luonnonkivijulkisivuissa kosteus siirtyy pääasiassa kapillaarisesti ja diffuusiolla tiilen sekä laastin huokosverkostossa. Muita siirtymismuotoja ovat veden painovoimainen siirtyminen sekä konvektio tuuletusurassa. Näistä kapillaarisuudella on suurin mer-

kitys rakenteen kostumisen kannalta, kun taas konvektiolla ja diffuusiolla on merkitystä rakenteen kuivumiseen.



Kuva 4.2 Kosteuden siirtymis- ja sitoutumismuodot. (7)

4.5.1. Vesihöyryn diffuusio

Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, jonka seurauksena kaasun pitoisuuserot (osapaine-erot) pyrkivät tasoittumaan. Kaasun nettovirtaus tapahtuu korkeammasta pitoisuudesta matalampaan. Talvella ulkoilman kosteuspitoisuuden ollessa alhaalla, kosteusvirta kulkee sisäilmasta ulospäin. Kesällä diffuusion suunta vaihtelee ulkoilman olosuhteiden mukaan. Päivisin diffuusio voi suuntautua ulkoilmasta sisäänpäin. Öisin, kun ulkoilma jäähtyy, diffuusion suunta muuttuu. (7), (26)

Homogeenisessa ainekerroksessa diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys ($\text{kg/m}^2\text{s}$) voidaan laskea Fickin lain avulla:

$$g = -\delta_v \nabla v = -\left(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad (4.8)$$

missä

$$\delta_v = \text{aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna (m}^2\text{/s)}$$

Jotkut laskentaohjelmat, kuten WUFI, käyttävät diffuusiovastuskerrointa vesihöyrynläpäisevyyden sijasta. Materiaalien diffuusiovastuskerroin voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\mu = \frac{D_a}{\delta_v} \text{ tai } \mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (4.9)$$

missä

D_a = ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmaistuna (m^2/s)

δ_a = ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna

Yleensä rakenne kuitenkin kostuu useista homogeenisista ainekerroksista. Tällöin rakenteen läpi kulkeva kosteusvirta saadaan laskettua materiaalien vesihöyrynvastusten avulla kaavalla:

$$g = (v_i - v_e)/z_{tot} \quad (4.10)$$

missä

v_i, v_e = vesihöyrypitoisuudet sisä- ja ulkoilmassa (kg/m^3)

$Z_{tot} = Z_{v,1...n} + Z_{v,si} + Z_{v,se}$ = rakenteen vesihöyrynvastus (s/m)

$Z_v = \frac{d}{\delta_v}$ = materiaalin vesihöyrynvastus (s/m)

$Z_{v,s} = \frac{1}{\beta_v}$ = pinnan vesihöyrynvastus (s/m)

Kun tiedetään pinnan kosteudensiirtokerroin, rakenteen pinnasta ilmaan siirtyvä kosteusvirta saadaan määritettyä kaavalla:

$$g = \beta_v(v_s - v_a) \quad (4.11)$$

missä

v_s, v_a = vesihöyrypitoisuudet rakenteen pinnassa ja ympäröivässä ilmassa (kg/m^3)

$\beta_v = \frac{\alpha_{conv}}{\rho_a c_{pa}}$ = pinnan kosteudensiirtokerroin (m/s)

ρ_a = ilman tiheys (kg/m^3)

c_{pa} = ilman ominaislämpö ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$)

Vesihöyrynläpäisevyys aineessa ei ole vakio, vaan riippuu lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Kapillaarisella alueella diffuusiolla siirtyvän vesihöyryn määrä pienenee, koska huokoset täyttyvät vedellä ja vesihöyryn siirtyminen vaikeutuu. Materiaalien vesihöyrynläpäisevyyden arvossa on usein otettu huomioon kaikki kosteuden siirtymismuodot. Yleensä kosteuden siirtymismuodot eivät kuitenkaan vaikuta samaan suuntaan seinärakenteessa. Siksi tarkemmissa laskelmissa tulisi käyttää kuivien olosuhteiden vesihöyrynläpäisevyyden arvoa ja ottaa muut siirtymismuodot (pintadiffuusio, kapillaarisuus) huomioon kosteusediffusiviteetin tai kosteudenjohtavuuden (tarkemmin luvussa 4.5.3) arvossa. Näin menetellään joissakin laskentaohjelmissa, kuten WUFI:ssa. (26), (28), (29)

4.5.2. Vesihöyryn konvektio

Vesihöyryä kulkeutuu konvektion eli ilmavirtausten välityksellä materiaalin huokosissa tai rakenteessa olevissa raoissa ja rei'issä. Ilmavirtauksia aiheuttavat rakenteessa vaikuttavat ilmanpaine-erot, joita saavat aikaan mm. tuuli, lämpötilaerot sekä ilmanvaihto. Tuulen vaikutuksesta konvektion suunta vaihtelee ja vaikutus on lyhytaikainen. Lämpötilaerot aiheuttavat pidempiaikaista termistä konvektiota. Konvektion määrään vaikuttaa myös se, missä kohden rakennetta epätiiviyyskohdat sijaitsevat. Ilmanvaihdolla saadaan aikaan pysyvää konvektiota. Tällöin ilmavirran suunta on yleensä sisäänpäin. (27), (26)

Materiaalin tai raon läpi konvektiolla siirtyvä kosteusvirta (kg/s) voidaan laskea kaavalla:

$$g_{conv} = R_a \cdot v \quad (4.12)$$

missä

R_a = läpi virtaava ilmamäärä (m³/s)

v = materiaalin läpi virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

Konvektion tapahtuessa huokoisen materiaalin läpi, ilmavirtaus saadaan kaavalla:

$$R_a = \frac{p_i - p_e}{\Sigma R} \quad (4.13)$$

missä

$R = d/\kappa_a$ = rakenteessa olevan ainekerroksen ilmanvastus (sPa/m)

κ_a = aineen ilmanläpäisevyys (m²/sPa)

p_i, p_e = sisä- ja ulkoilman ilmanpaineet (Pa)

Konvektio huokoisen materiaalin läpi on kuitenkin yleensä merkityksettömän pieni verrattuna rakenteen rakojen läpi tapahtuvaan konvektioon. Ilmavirtaus rakenteessa olevassa raossa (syvyys l, leveys b, pituus d) saadaan kaavalla:

$$R_a = bd \cdot \frac{b^2}{12 \cdot \eta_a} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (4.14)$$

missä

η_a = ilman dynaaminen viskositeetti (Ns/m²)

Rakojen ja halkeamien läpi tapahtuvaa konvektiota on käsitelty enemmän lähteissä (27) ja (26).

Konvektio vaikuttaa myös tuuletusuran/tuuletusvälin vesihöyrypitoisuuteen kuljetamalla kosteutta tuuletusvälissä. Olosuhteista riippuen ulkoa tuleva ilmavirta voi joko kostuttaa tai kuivattaa tuuletusuran ilmaa. Tuuletusurien kuivattavaa vaikutusta käsitellään tarkemmin luvussa 4.6.2.

4.5.3. Kapillaarinen siirtyminen

Kapillaarihuokosten toimintaa voidaan kuvata pyöreän putken avulla, joka on upotettu alapäästään veteen. Vesi pyrkii nousemaan putken reunoja pitkin ylös nesteen sisäisen koheesion sekä nesteen ja kapillaariputken seinämän välisen adheesion avulla. Tällöin veden pinta kaareutuu ja pintaan syntyy pintajännitys, joka aiheuttaa paine-eron veden pinnan ja ilman välille. Tätä paine-eroa kutsutaan huokosalipaineeksi, s (N/m^2), joka on tasapainossa veden aiheuttaman hydrostaattisen paineen kanssa. Tasapainoyhtälö voidaan esittää seuraavasti:

$$s = \rho gh = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_k} \quad (4.15)$$

missä

ρ = nesteen tiheys (kg/m^3)

g = putoamiskiihtyvyys ($9,81 \text{ m/s}^2$)

h = nousukorkeus (m)

σ = veden pintajännitys, joka nostaa vettä ylöspäin putken reunoilla (N/m)

θ = reunakulma veden pinnan ja putken seinämän välillä

r_k = kapillaariputken säde (m)

Kapillaariseen veden siirtymiseen vaikuttavat kapillaarihuokosten koko, määrä sekä huokosverkoston yhtenäisyys. Huokoskoon kasvaessa kapillaarinen imuvoima ja nousukorkeus pienenevät mutta imunopeus ja kosteudenjohtavuus lisääntyvät. Lämpö vaikuttaa myös osaltaan kapillaariseen veden siirtymiseen. Rakenteen lämpötilan laskiessa kapillaarivirtaus hidastuu ja veden jäätyessä loppuu kokonaan. (26), (29), (7)

Kun materiaalin alapinta on kosketuksissa veteen, saadaan kapillaarisen kosteusvirran tiheys g_{cap} ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) materiaaliin laskettua kaavasta:

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (4.16)$$

missä

A_w = kapillariteettikerroin (veden imeytymiskerroin) ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2})$)

t = aika (s)

Veden tunkeutumisvyyden ja ajan välille saadaan yhteys:

$$x_p = B_w \cdot \sqrt{t} \quad (4.17)$$

missä

B_w = veden tunkeutumiskerroin ($\text{m/s}^{1/2}$)

Näillä kaavoilla voidaan laskea kapillaarivirtaus tapauksissa, joissa kosteus siirtyy alhaalta ylöspäin materiaalin ollessa jatkuvassa vesikosketuksessa. Tällainen tilanne voi

olla esimerkiksi alapohjarakenteissa. Tarkasteltaessa alhaalta ylöspäin siirtyvää kosteutta, materiaaliin kapillaarisesti siirtyvän veden kokonaismäärää voidaan arvioida kaavalla:

$$m'' = A_w \cdot \sqrt{t} \quad (4.18)$$

Kapillaarivirtaus voi myös tapahtua vaakasuunnassa, alaspäin tai materiaalin sisällä kosteuspitoisuuden ollessa korkea. Tällaisissa tapauksissa saadaan kapillaarisen kosteusvirran tiheys laskettua Darcyn laista:

$$g_{cap} = \rho_w \frac{k_w}{\eta_w} \frac{\partial p}{\partial x} = -\kappa_w \frac{\partial s}{\partial x} \quad (4.19)$$

missä

k_w = materiaalin permeabiliteetti vedelle (m^2)

η_w = veden dynaaminen viskositeetti (Ns/m^2)

κ_w = kosteudenjohtavuus ($kg/(msPa)$)

Kosteudenjohtavuuden arvossa on huomioitu kaikki muut kosteuden siirtymismuodot paitsi vesihöyryn diffuusio. Vaihtoehtoisesti kosteusvirran tiheys voidaan määrittää kosteusdiffusiviteetin avulla:

$$g_{cap} = \rho_0 D_w \frac{\partial u}{\partial x} = -D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (4.20)$$

missä

ρ_0 = materiaalin kuivatiheys (kg/m^3)

D_w = kosteusdiffusiviteetti (m^2/s)

Kosteusdiffusiviteetti kertoo, kuinka nopeasti materiaalin kosteuspitoisuus asettuu uuteen tasapainotilaan. Se voidaan määrittää myös hygroskooppisella alueella oleville materiaaleille, koska arvo sisältää kaikki kosteuden siirtymismuodot. Kosteusdiffusiviteetti ei kuitenkaan ole aito kapillaarivirtauksen siirtopotentiaali, joten sen käyttö tarkemmissa laskelmissa voi aiheuttaa tuloksiin virhettä. (26), (29)

WUFI ohjelmassa käytetään kolmatta kapillaarivirtauksen siirtopotentiaalia; suhteellista kosteutta. Tämä on mahdollista, koska suhteellisen kosteuden ja huokosalipaineen välillä on suhde:

$$\ln \varphi = -\frac{sM_w}{\rho_w RT} \quad (4.21)$$

Kapillaarisen kosteusvirran tiheys lasketaan tässä tapauksessa vedenjohtavuuskertoimen avulla kaavasta:

$$g_{cap} = -D_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (4.22)$$

missä

$$D_{\varphi} = -D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} = \text{materiaalin vedenjohtavuuskerroin (kg/(ms))}$$

Niitä tapauksia varten, joissa tiedetään ainoastaan materiaalin kapillariteettikerroin, WUFI:ssa on likiarvokaava kosteusdiffusiviteetin määrittämistä varten. Varsinaisen kapillaarisen siirtymisen jälkeen, kosteus pyrkii tasoittumaan materiaalin huokosverkossaan. Tätä kutsutaan kosteuden uudelleenjakaantumiseksi ($D_{w,d}$). WUFI ohjelma ottaa huomioon myös tämän kosteuden siirtymismuodon. (26), (29)

4.5.4. Pintadiffuusio

Pintadiffuusiolla tarkoitetaan vesimolekyylien ”hyppimisestä” aiheutuvaa kosteuden siirtymistä. Siinä huokosten pintaan kiinnittyneet vesimolekyylit irrottautuvat takaisin huokosilmaan kosteuspitoisuuden kasvaessa ja absorboituvat uuteen kohtaan.

Pintadiffuusiassa vesimolekyylit siirtyvät korkeammasta pitoisuudesta matalampaan pitoisuuteen. Pintadiffuusio tapahtuu siis aina samaan suuntaan kuin kapillaarivirtaus, joten kummallekin siirtymistavalle voidaan käyttää kosteuden siirtopotentiaalina materiaalin kosteuspitoisuutta tai huokosilman suhteellista kosteutta. Tästä johtuen pintadiffuusiota tarkastellaan aina kapillaarisuuden yhteydessä eikä sitä tarvitse erikseen laskea. (26)

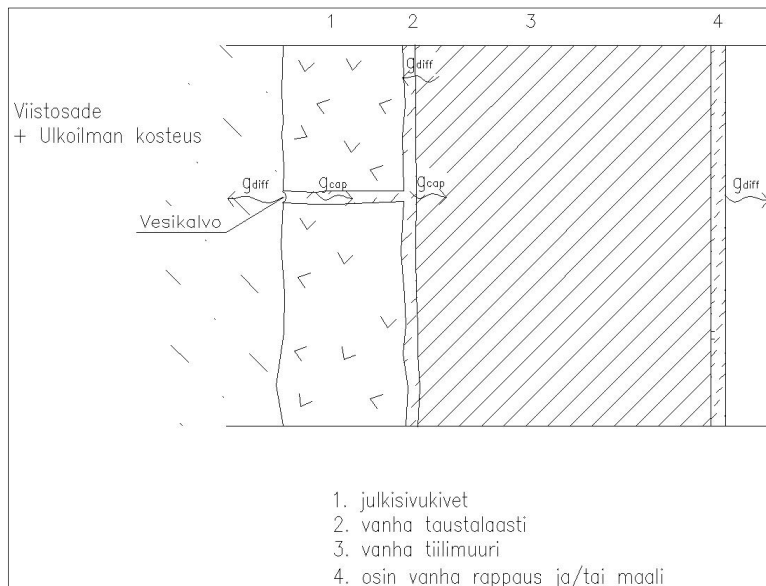
4.5.5. Painovoimainen siirtyminen

Painovoimaisella siirtymisellä tarkoitetaan kosteuden siirtymistä, vetenä tai lumena, maan vetovoiman vaikutuksesta. Tyypillisiä painovoimaisen siirtymisen muotoja on veden valuminen pintoja pitkin ja vuotovesien valuminen rakenteen epäjatkuvuuskohdissa (raot ja halkeamat). Painovoimainen siirtyminen on mahdollista myös suurihuokoisissa materiaaleissa. (26)

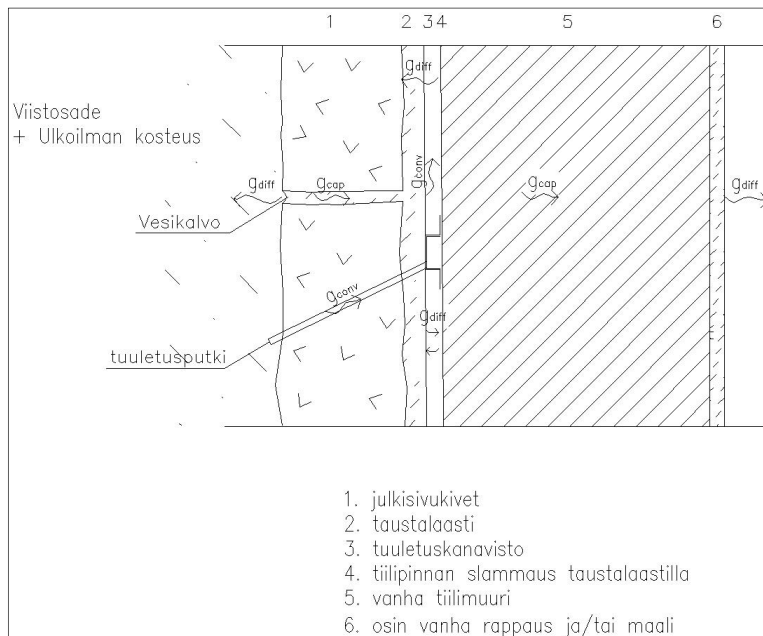
Luonnonkivirakenteissa kosteuden painovoimaista siirtymistä voi tapahtua luonnonkivien halkeamia pitkin sekä pitkälle rapautuneessa taustalaastissa. Tällöin vesi pääsee suhteellisen vapaasti virtaamaan rakenteen alaosiin, jolloin se entisestään lisää rakenteen kosteusrasitusta.

4.6. Rakenteen kostuminen ja kuivuminen

Luonnonkivijulkisivujen kostumiseen ja kuivumiseen vaikuttavat monet eri tekijät. Pääasialliset vanhan sekä korjatun rakenteen kosteuslähteet, kosteuden siirtymistavat ja kuivumistavat on esitetty kuvissa (Kuva 4.3 ja Kuva 4.4).



Kuva 4.3 Periaatepiirros kosteuden kulkeutumisesta vanhassa rakenteessa



Kuva 4.4 Periaatepiirros kosteuden kulkeutumisesta korjatussa rakenteessa

Luonnonkivijulkisivuissa diffuusiolla siirtyvä kosteus voi kondensoitua taustalaastikerrokseen kylminä vuodenaikoina. Tämä on mahdollista, koska luonnonkivi on tiivis ja hyvin lämpöä johtava materiaali. Tällöin vesihöyry ei pääse virtaamaan rakenteen läpi, vaan tiivistyy kylmän luonnonkiven pintaan.

Diffuusion sekä konvektion vaikutuksesta kosteus voi tiivistyä myös tuuletuskanaviston pintaan. Lämpimän ulkoilman virratessa tuuletuskanavistoon, jonka pintalämpötila on ulkoilmaa kylmempi, syntyy kondenssi. Tällainen tilanne on keväisin, jolloin rakenteen lämpötila nousee ulkoilman lämpötilaa hitaammin.

Kondensoitumisen vaikutus rakenteen kastumiseen on kuitenkin huomattavasti viistosadetta pienempi. Luonnonkivijulkisivut kastuvatkin pääosin viistosateen vaikutuksesta. Viistosade imeytyy kapillaarisesti rakenteeseen huokoisten laastisaumojen kautta,

josta kosteus jatkaa kapillaarista siirtymistä rakenteen sisäosiin. Rasiustasosta riippuen kosteus voi imeytyä syvälle tiilimuriin, koska sekä tiilellä että laastilla on suuri kapillaarinen kosteudenjohtavuus. Jos rakenteen kuivumispotentiali on kosteusrasitusta pienempi, muodostuu rakenteeseen vuosittain kasvava kosteuskertymä.

Luonnonkivijulkisivujen kuivuminen sateen jälkeen on huomattavasti hitaampaa kuin kostuminen. Tämä johtuu pääosin siitä, että rakenne pääsee kastumaan tiilen ja laastin kapillaarisista ominaisuuksista johtuen, mutta kuivuminen ulospäin voi tapahtua ainoastaan laastisaumojen välityksellä, jolloin haihduttavaa pinta-alaa on hyvin vähän. Korjatun rakenteen kuivuminen tapahtuukin pääosin tuuletuskanavia pitkin, jolloin kosteus haihtuu märästä taustalaastista tuuletuskanavaan ja siirtyy konvektion välityksellä ulkoilmaan. Alkuperäisen rakenteen kuivuminen on tapahtunut sisäilmaan diffuusion vaikutuksesta. Korjatussa rakenteessa diffuusiolla tapahtuva kuivuminen on kuitenkin melko vähäistä verrattuna konvektion vaikutukseen.

4.6.1. Kosteuden kerääntyminen luonnonkivijulkisivuissa

Rakenteen läpi kulkevasta vesihöyrystä osa voi tiivistyä vedeksi kohdissa, joissa rakenteen lämpötilaa vastaava kyllästyskosteus alittaa ilman vesihöyrypitoisuuden. Tällöin kyllästyskosteuden ylittävä osuus tiivistyy vedeksi. Vesihöyry voi siirtyä kondensoitumiskohtaan diffuusiolla, jolloin kyseessä on diffuusion kondenssi tai konventiolla, jolloin kyseessä on konvektion kondenssi.

Kosteuden kondensoitumista tarkasteltaessa tutkitaan ensiksi onko tiivistyminen mahdollista. Jos tiivistymistä ei sallita, tulee rakennetta muuttaa siten, että tiivistymistä ei pääse tapahtumaan. Jos tiivistyminen sallitaan, lasketaan ensiksi tiivistyvän veden määrä tiivistymiskaudella ja sen jälkeen kuivuminen kuivumiskaudella. Oleellista on, että kosteuspitoisuus ei kasva vuosien mittaan.

Diffuusion kondenssi (7), (26), (27)

Diffuusiolla siirtyvän kosteuden kondensoitumista stationääritilassa voidaan arvioida yksinkertaisella käsilaskentamenetelmällä. Siinä vuosi jaetaan kahteen osaan: tiivistymisjaksoon ja kuivumisjaksoon. Ilmastoparametreinä käytetään kahden kylmimmän/lämpimimmän kuukauden keskiarvoja. Laskentamenetelmässä ei kuitenkaan huomioida muita kosteuden siirtymismenetelmiä. Lisäksi ympäristöolosuhteet otetaan huomioon hyvin karkeasti.

Jotta saadaan selville kondensoituuko rakenteeseen vettä, selvitetään rakenteen lämpötila- ja kosteuskäyrät. Materiaalin lämpötila- ja vesihöyrypitoisuudet kohdassa x saadaan kaavoista:

$$v_x = v_i - \frac{\sum Z_x}{Z_{tot}}(v_i - v_e) \text{ ja } T_x = T_i - \frac{\sum R_x}{R_{tot}}(T_i - T_e) \quad (4.23)$$

missä

$$Z_{tot} = Z_{v,1...n} + Z_{v,si} + Z_{v,se} = \text{koko rakenteen vesihöyrynvastus (s/m)}$$

$$\begin{aligned}\sum Z_x &= \text{rakenteen vesihöyrynvastusten summa kohdassa } x \text{ (s/m)} \\ v_i, v_e &= \text{sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m}^3\text{)} \\ R_{tot} &= R_{1\dots n} + R_{si} + R_{se} = \text{koko rakenteen lämmönvastus (m}^2\text{K/W)} \\ \sum R_x &= \text{rakenteen lämmönvastusten summa kohdassa } x \text{ (m}^2\text{K/W)} \\ T_i, T_e &= \text{sisä- ja ulkoilman lämpötila (}^\circ\text{C)}\end{aligned}$$

Jos rakenteeseen tiivistyy kosteutta alueella A-B, saadaan tiivistyvän veden määrä laskettua kaavasta:

$$g_{cond} = \frac{v_i - v_B}{Z_{v,B}} - \frac{v_A - v_e}{Z_{v,A}} \quad (4.24)$$

missä

$Z_{v,A}$ = ulkoilman ja kohdan A välisten materiaalikerrosten vesihöyrynvastus (s/m)

$Z_{v,B}$ = sisäilman ja kohdan B välisten materiaalikerrosten vesihöyrynvastus (s/m)

Kaavan ensimmäinen osa kuvaa sisältäpäin tulevaa kosteusvirtaa ja jälkimmäinen osa ulospäin suuntautuvaa kosteusvirtaa. Tiivistymiskaudella kerääntyvää kosteutta voidaan arvioida kaavalla:

$$m''_{cond} = g_{cond} \cdot t_{cond} \quad (4.25)$$

missä

t_{cond} = tiivistymiskauden pituus (s)

Kuivumiskaudella lasketaan vastaavalla tavalla poistuvan kosteuden määrä kaavasta:

$$g_{dry} = \frac{v_A - v_e}{Z_{v,A}} + \frac{v_B - v_i}{Z_{v,B}} \quad (4.26)$$

Kaavan ensimmäinen termi kuvaa tiivistymiskohdan kuivumista ulospäin ja jälkimmäinen tiivistymiskohdan kuivumista sisäänpäin. Vastaavasti kuivumiskaudella poistuvan kosteuden määrää voidaan arvioida kaavalla:

$$m''_{dry} = g_{dry} \cdot t_{dry} \quad (4.27)$$

missä

t_{dry} = kuivumisjakson pituus (s)

Diffuusion kondenssi voidaan laskea käsin tapauksissa, joissa tarkastellaan kosteuden tiivistymistä pitkällä aikavälillä. Joskus on kuitenkin tarpeellista tarkastella kosteusvaihteluita lyhyillä ajanjaksoilla, kuten vuorokauden aikana. Tällaisissa tapauksissa rakenne täytyy käsitellä epästationäärisessä tilassa, jolloin kosteusvirta ei ole ajan suh-

teen vakio. Lähteissä (26) ja (29) on käsitelty joitakin epästationäärisiä diffuusiota tapauksia, jotka soveltuvat käsilaskentaan. Tarkemmat laskelmat tehdään yleensä tähän tarkoitukseen soveltuvalla laskentaohjelmalla, esimerkiksi WUFI:lla.

Pintakondenssi (27)

Diffuusiolla siirtyvä kosteus voi kondensoitua myös rakenteen pinnalle, jos rakenteen pintalämpötila alittaa ympäröivän ilman kastepistelämpötilan. Pintakondenssin määrä voidaan laskea kaavalla:

$$g = \beta_v (v_a - v_{sat(T)}) \quad (4.28)$$

missä

β_v = pinnan kosteudensiirtokerroin (m/s)

v_a = ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

$v_{sat(T)}$ = vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus rakenteen pinnassa (kg/m³)

Pintakondenssin määrää voidaan rajoittaa lämmittämällä rakenteen pintaa, jolloin vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus rakenteen pinnassa kasvaa.

Konvektion kondenssi (7), (26) , (27)

Ilmavirtauksen tapahtuessa lämpimältä puolelta kylmempään, voi kosteutta kondensoitua materiaalikerrokseen. Kun tiedetään rakenteen läpi virtaava ilmamäärä R_a , voidaan kondensoituvan kosteuden määrä laskea kaavalla:

$$G_{cond} = R_a (v_i - v_{sat(T)}) \quad (4.29)$$

missä

v_i = materiaaliin virtaavan lämpimämmän sisäilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

$v_{sat(T)}$ = huokosilman kyllästyskosteuspitoisuus materiaalin pinnassa (kg/m³)

Ilmavirtauksen tapahtuessa kylmemmältä puolelta lämpimään, materiaalikerros voi kuivua. Tällöin poistuvan kosteuden virta voidaan laskea kaavalla:

$$G_{dry} = R_a (v_{(T)} - v_e) \quad (4.30)$$

missä

v_e = materiaaliin virtaavan kylmemmän ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

$v_{(T)}$ = huokosilman vesihöyrypitoisuus materiaalin pinnassa (kg/m³)

Konvektiolla tiivistyvän kosteuden määrää on käytännössä hyvin hankalaa laskea tarkasti, sillä ilmavirtaukset rakenteessa riippuvat monista olosuhdetekijöistä. Lisäksi aina kun rakenteessa on kosteuspitoisuuseroja, esiintyy myös diffuusiota. Tästä syystä kon-
densoituneen kosteuden määrän arviointi edellyttää aina yhdistettyä konvektion ja dif-
fuusion tarkastelua.

4.6.2. Luonnonkivijulkisivujen kuivuminen

Rakenteiden kuivuminen tapahtuu pääosin haihtumalla kosteasta pinnasta ilmaan. Kui-
vumisnopeus riippuu monista tekijöistä, kuten auringon säteilystä, ulkoilman suhteelli-
sesta kosteudesta sekä tuulen nopeudesta. Pääasiallisesti kuivuminen tapahtuu ulkoil-
maan, joko haihtumalla suoraan pinnasta tai tuuletusrakojen välityksellä.

Rakenteen kuivumisvaiheet (26), (29)

Rakennekerroksen kuivuminen ulkoilmaa vastaavaan tasapainokosteuteen voidaan jakaa
kolmeen vaiheeseen:

- Vaihe 1: koko rakenteessa $w > w_{crit}$
- Vaihe 2: sisäosassa $w > w_{crit}$
- Vaihe 3: koko rakenteessa $w < w_{crit}$

Ensimmäisessä vaiheessa koko rakenne on kapillaarisella alueella, jolloin kosteus
siirtyy rakenteesta pois pintadiffuusion, diffuusion ja kapillaarivirtauksen vaikutuksesta.
Rakenteen kuivumisnopeuden määrää haihtuminen pinnasta ilmaan, sillä rakenteen ve-
sihöyrynvastus ei vielä vaikuta kuivumisnopeuteen. Ensimmäisen vaiheen kuivumisno-
peus voidaan laskea kaavalla:

$$g = \beta_v (v_{sat(T)} - v_a) \quad (4.31)$$

missä

β_v = pinnan kosteudensiirtokerroin (m/s)

$v_{sat(T)}$ = huokosilman kyllästyskosteuspitoisuus haihduttavassa pinnassa
(kg/m³)

v_a = ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

Toisessa vaiheessa rakenteen kosteuspitoisuus pinnassa on laskenut sen verran, ettei
yhtenäinen kapillaarinen siirtyminen ole mahdollista. Tällöin kuivumisnopeus alkaa
hidastua. Kuivumisnopeutta hidastaa rakenteen kuivuneen pinnan vesihöyrynvastus.
Kosteuden siirto rakenteen pintaan ja pinnasta ilmaan tapahtuu edelleen pintadiffuusion,
diffuusion ja osittaisen kapillaarivirtauksen vaikutuksesta.

Kolmannessa vaiheessa rakenteen ulkopinnan kosteus saavuttaa hygroskooppisen
tasapainokosteuden ja rakenne kuivuu pelkästään sisäosista. Tässä vaiheessa kapillaari-
sen kosteudensiirron ja pintadiffuusion osuus loppuu kokonaan tai on vähäinen, riippu-
en ulkoilman olosuhteista.

Toisen ja kolmannen vaiheen kuivumisnopeus voidaan laskea kaavalla:

$$g = \frac{v_s - v_a}{Z_{v,s} + Z_{v,\varphi}} \quad (4.32)$$

missä

$Z_{v,\varphi}$ = rakenteen puolivälin ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastus (s/m)

$Z_{v,s}$ = rakenteen pinnan vesihöyrynvastus(s/m)

Mitä pidemmälle kuivumisrintama rakenteessa etenee, sitä enemmän vesihöyrynvastus hidastaa kuivumisnopeutta.

Eri rakennusmateriaalit kuivuvat eri vaiheiden mukaan. Esimerkiksi poltetut tiilet kuivuvat pääosin ensimmäisen vaiheen mukaan johtuen runsaasta kapillaarihuokosten määrästä. Tällöin kosteus voi liikkua kapillaarisesti rakenteen sisäosista pintaan kohti ja pinta pysyy pitkään kosteana. Jotkut materiaalit eivät kuivu lainkaan ensimmäisen vaiheen mukaan johtuen pienten huokosten runsaasta määrästä. Tällainen tilanne on esimerkiksi vanhassa betonissa uudelleenkastumisen jälkeen.

Tuuletuskanavien vaikutus kuivumiseen (30), (28), (27), (26)

Tuuletuskanavan kosteusteknisen toiminnan selvittämiseksi täytyy tietää ilman virtausnopeus tuuletuskanavassa sekä ilman ja rakenteen lämpötilat ja kosteuspitoisuudet. Kun tiedetään ilman virtausnopeus tuuletuskanavassa, poistuva kosteus (kg/s) voidaan laskea kaavalla:

$$G = R_a \cdot (v_{out} - v_{in}) \quad (4.33)$$

missä

$R_a = r_a \cdot A$ = tuuletuskanavassa virtaava ilmamäärä (m³/s)

r_a = ilman virtausnopeus m/s

$A = a \cdot b$ = tuuletuskanavan pinta-ala (m²)

v_{in} = tuuletuskanavaan tulevan ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

v_{out} = tuuletuskanavasta poistuvan ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

Ilman vesihöyrypitoisuus tuuletuskanavassa etäisyydellä x kanavan alkupäästä saadaan laskettua kaavalla:

$$v_{a(x)} = v_s - (v_s - v_{in})e^{-kx} \quad (4.34)$$

missä

$k = 1/(b \cdot r_a \cdot Z)$

Z = rakenteen vesihöyrynvastus (s/m)

v_s = ilman vesihöyrypitoisuus tuuletuskanavan pinnalla (kg/m³)

v_{in} = tuuletuskanavaan tulevan ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

Ja vastaavasti tuuletuskanavassa virtaavan ilman lämpötila etäisyydellä x saadaan kaavasta:

$$T_{a(x)} = T_0 - (T_0 - T_{in})e^{-kx} \quad (4.35)$$

missä

$$k = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot b \cdot r_a \cdot R_x}$$

R_x = rakenteen lämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

T_0 = ilman lämpötila vastaavassa tuulettumattomassa kanavassa ($^{\circ}\text{C}$)

T_{in} = tuuletuskanavaan tulevan ilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)

Edellä mainitut kaavat muuttuvat hieman, jos kyseessä on ensimmäinen kuivumisvaihe. Tällöin käytetään haihduttavan pinnan kyllästyskosteuspitoisuutta vesihöyrypitoisuuden sijaan. Myös vesihöyrynvastus muuttuu kuivumisvaiheen mukaan.

Tuuletuskanavien kautta poistuvaan kosteusmäärään vaikuttavat pääasiassa ilman sitoma kosteusmäärä sekä ilmavirran suuruus. Ilman sitoma kosteusmäärä eli kosteuden poistopotentiaali riippuu ulkoilman kosteuspitoisuudesta sekä vesihöyrypitoisuudesta tuuletuskanavan pinnalla. Edellytyksenä rakenteen kuivumiselle on, että kanavistoon virtaavan ulkoilman kosteuden täytyy olla pienempi kuin haihduttavan pinnan kosteuspitoisuuden. Vastaavasti tuuletuskanavan lämpötilan tulee olla ulkoilman lämpötilaa suurempi. Lämpötila vaikuttaa myös ilman sitomaan kosteusmäärään siten, että ilman lämmitessä tuuletuskanavassa, sen kosteuden sitomiskyky kasvaa. Jotta kosteutta ei pääsisi tiivistymään ilman ulosmenoputkien kohdalle, tuuletusurasta poistuvan kosteuspitoisuuden ei tule ylittää ulkoilman kyllästyskosteutta.

Virtausnopeuteen tuuletuskanavistossa vaikuttavat paine-erot kanaviston eri osien välillä ja kanavistossa tapahtuvat painehäviöt. Paine-eroja aiheuttavat tuulen paine ja terminen konvektio. Painehäviöt voidaan jakaa kitkahäviöihin ja kertahäviöihin. Kitkahäviöt tapahtuvat koko kanaviston pituudella. Kertahäviöitä syntyy kanavan poikkileikkauksen muutoksissa. Lämpötila vaikuttaa myös virtausnopeuteen siten että tuuletuskanavan lämpötilan kasvaessa, terminen konvektio lisääntyy ja kuivuminen nopeutuu. Tuulen aiheuttama paine-ero voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta p = \frac{(C_1 - C_2) \rho r^2}{2} \approx (0,2 \dots 0,4) \frac{\rho r^2}{2} \quad (4.36)$$

missä

$C_1 - C_2$ = muotokertoimet sisään ja ulosmeno aukkojen kohdalla

ρ = ilman tiheys (kg/m^3)

r = tuulen nopeus (m/s)

Lämpötilaeroista johtuvat luonnollinen paine-ero saadaan laskettua kaavalla:

$$\Delta p = (\rho_1 - \rho_2)gh \approx 0,043\Delta Th \quad (4.37)$$

missä

$$\rho_1, \rho_2 = \frac{353}{T_{1,2}} = \text{tuuletuskanavaan tulevan ja poistuvan ilman tiheydet} \\ (\text{kg/m}^3) \\ \Delta T = T_1 - T_2 = \text{tuuletuskanavaan tulevan ja poistuvan ilman lämpötilat} \\ (^\circ\text{C}) \\ h = \text{tuuletuskanavan korkeus (m)}$$

Koko tuuletuskanavistossa tapahtuvat painehäviöt saadaan eri osien kitka- ja kertahäviöiden summana kaavasta:

$$\Delta p = \Sigma \left[f \cdot \left(\frac{L}{d} \right) \left(\frac{\rho \cdot r_a^2}{2} \right) \right] + \Sigma \left[k \cdot \left(\frac{\rho \cdot r_a^2}{2} \right) \right] \quad (4.38)$$

missä

$$d = \frac{2ab}{a+b} = \text{hydraulinen halkaisija (m)} \\ k = \text{kertahäviökerroin} \\ f = \text{kitkakerroin}$$

Kertahäviökertoimet yleisimmissä tapauksissa saadaan laskettua kaavoista:

$$k_c = (1 - \sigma)^2 + K_c \quad (4.39) \\ k_e = -(1 - \sigma)^2 + K_e \\ k_b = 1,2$$

missä

$$\sigma = \frac{A_1}{A_2} = \text{osien poikkileikkauksien suhde} \\ K_c = 0,98R_e^{-0,03} + (-0,067\sigma + 0,373\sigma^2) \\ K_e = -0,036 + 9,6 \cdot 10^{-5}R_e + (0,78 - 1,56\sigma)$$

Ilman virtausnopeuden kannalta on ratkaisevaa, onko virtaus laminaarista vai turbulentista. Virtausnopeus on laminaarista, kun Reynoldsin luku on alle 2000 ja turbulentista, kun Reynoldsin luku on yli 3500. Väliin jäävä alue on ns. siirtymäalue. Reynoldsin luku saadaan laskettua kaavalla:

$$R_e = \frac{r_a \cdot d}{\gamma_a} \quad (4.40)$$

missä

$$\gamma_a = \text{ilman kinemaattinen viskositeetti (m}^2/\text{s)}$$

Tuuletuskanavan ilmavirtaus stationääritilassa voidaan arvioida karkeasti käsilaskentaa varten edellä mainituista kaavoista iteroimalla. Jos ilmavirtaus muuttuu, täytyy tuuletuskanavan kosteuskentän tarkastelu kuitenkin tehdä virtauslaskentaohjelman avulla.

5. RAKENTEEN KOSTEUSTEKNINEN TARKASTELU

5.1. Tutkimusaineisto

Työssä tutkittiin korjatun luonnonkivijulkisivun kosteusteknistä toimintaa. Alkuperäisen seinärakenteen sekä korjatun, tuuletusuritetun ja eri tavoin lämmitetyn seinärakenteen kosteusteknistä toimintaa vertailtiin laskennallisesti. Laskelmissa käytettiin todellista kohdetta eli Helsingin rautatieaseman kellotornin korjattua julkisivua, johon on asennettu lämmityskaapelit sekä tuuletuskanavisto taustalaastikerrokseen (ks. luku 2.6). Pääpaino laskelmissa oli selvittää, kuinka suurella teholla ja kuinka kauan rakennetta tulisi lämmittää, jotta rakenteeseen ei muodostuisi vuosittain kasvavaa kosteuskertymää. Laskelmat tehtiin kosteusteknistä tarkastelua varten kehitetyllä tietokoneohjelmalla (WUFI), käyttäen apuna käsilaskentaa.

5.1.1. Laskentaohjelma

Tutkimuksessa käytettäviksi laskentaohjelmiksi valittiin WUFI 2D 3.3. Pääasiallinen valintaperuste oli ohjelman hyvät sovellusmahdollisuudet tarkasteltavaan tutkimusongelmaan nähden. Oleellista oli mahdollisuus lisätä rakenteeseen lämmön- ja kosteudenlähteet sekä ilmanvaihto. Myös materiaaliominaisuuksien muunneltavuus oli ohjelmalta vaadittava tärkeä ominaisuus. Lisäksi hyvä käytettävyys ja aiemmat hyvät kokemukset ohjelmasta vaikuttivat valintaan.

WUFI:n laskentaperiaatteina ovat lämpö- ja kosteusvirtojen laskenta todellisissa olosuhteissa eli epästationääritilassa. Kosteudensiirtymismenetelmistä ohjelma huomioi diffuusion, kapillaarisen siirtymisen sekä kosteuden uudelleenjakautumisen. Ulkoilman olosuhteista viistosateen sekä auringon säteilyn osuuden WUFI analysoi eri ilmansuuntien mukaan. Ohjelman laskentaperusteita on käsitelty luvussa 4.

5.1.2. Mallinnettava rakenne

Mallinnettaviksi rakenteiksi valittiin sekä vanha rakenne (US1) että korjattu rakenne (US2). Tämä tehtiin sen vuoksi että erilaisten rakennepaksuuksien, ilmansuuntien ja materiaaliominaisuuksien vaikutusta oli helpompi tutkia vanhalla rakenteella, joka on yksinkertaisempi kuin korjattu rakenne. Lisäksi tulosten tarkastelua varten tarvittiin tiedot lähtötilanteen kosteuspitoisuuksista. Tulosten vertailtavuuden vuoksi vanhan ja uuden rakenteen rakennepaksuudet olivat samat. Vanhan rakenteen (US1) rakennepak-

suudet ja ominaisuudet on esitetty taulukossa (Taulukko 5.1). Tarkemmat tiedot vanhan rakenteen rakennemallista ja ominaisuuksista ovat liitteessä 1.

Taulukko 5.1 Tarkasteltavat rakenteet.

Rakennetyyppi	Graniitti (mm)	Laastityyppi	d (mm)	Tuuletus	Lämmitys	Tiili (mm)
US1	250	K-laasti	60	EI	EI	600
US2_0	250	KS-laasti	60	KYLLÄ	0 teho	600
US2_1	250	KS-laasti	60	KYLLÄ	1/3 teho	600
US2_3	250	KS-laasti	60	KYLLÄ	3/3 teho	600
US2_4	250	KS-laasti	60	KYLLÄ	Optimoitu tapaus	600

Korjatun rakenteen (US2-variaatiot) rakennepaksuudet valittiin vanhan rakenteen (US1) laskentatulosten perusteella siten, että valittu tapaus oli korkeimmat kosteuspitoukset antava tapaus. Korjatussa rakenteessa sauma- ja taustalaasti vaihtuivat läpäisevästä kalkkilaastista hieman tiiviimpään kalkkisementtilaastiin. Korjausrakenteeseen lisättiin myös tuuletus ja teholtään säädettävissä oleva lämmitys. Rakennetyypin US2 erilaiset variaatiot ja rakennepaksuudet on koottu taulukkoon (Taulukko 5.1). Tarkemmat tiedot tuuletuskanavien ja lämpökaapeleiden sijainnista rakennemallissa löytyvät liitteistä 2-5.

5.1.3. Materiaaliominaisuudet

Laskelmissa käytettävien materiaaliominaisuuksien perusarvot saatiin WUFI:n materiaalitietokannasta. Niitä muokattiin kohteeseen sopiviksi kirjallisuudesta (31), (26), (32) saaduilla arvoilla. Laskentaparametrien perusarvot on koottu taulukkoon (Taulukko 5.2). Tarkemmat arvot (kapillaariset ominaisuudet, tasapainokosteuskäyrä) ovat liitteessä 6.

Taulukko 5.2 Materiaaliparametrien perusarvot.

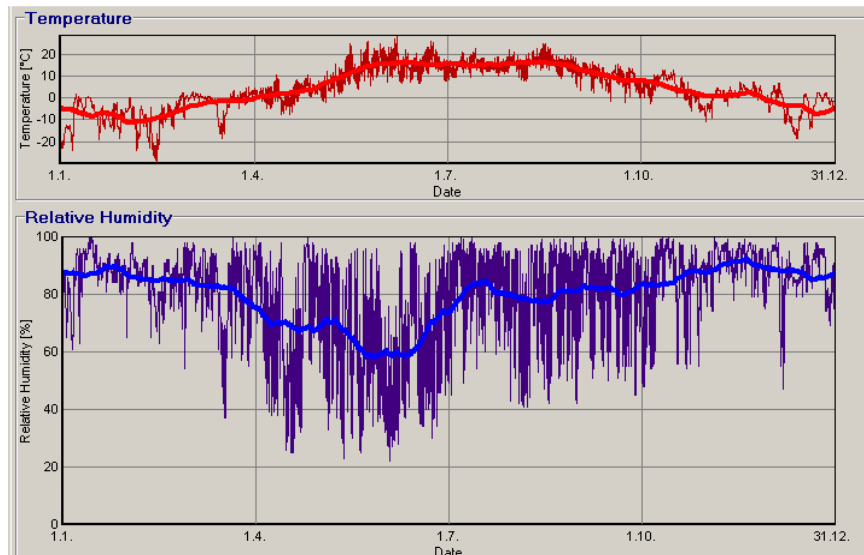
Materiaali	Tiheys (kg/m ³)	Huokoisuus (m ³ /m ³)	c _p (J/kgK)	λ (W/mK)	μ (-)
Graniitti	2800	0,015	850	3,5	500
K-laasti	1785	0,28	850	0,7	15
KS-laasti	1880	0,28	850	0,6	50
Tiili	1900	0,24	850	0,6	10

Tiilen ja laastien materiaaliarvot saatiin suoraan WUFI:n materiaalitietokannasta. Tiilen materiaaliominaisuuksissa oli otettu huomioon laastisaumojen osuus (pinta-aloihin suhteutettuna) niin, että rakenne vastaa yhtenäistä muurattua rakennetta.

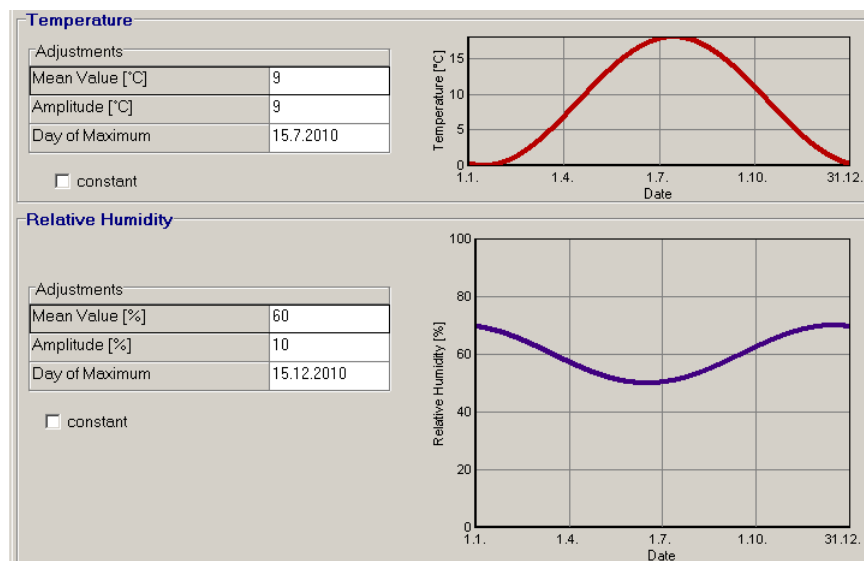
Graniitin materiaaliominaisuudet määritettiin WUFI:n materiaalitietokannasta löytyvien arvojen pohjalta. Niitä täydennettiin kirjallisuudesta saaduilla arvoilla.

5.1.4. Ilmasto-olosuhteet

Kohteen ulkoilman olosuhteina käytettiin WUFI ohjelman tietokannasta saatavaa Helsingin säätiedostoa, joka on Suomen Ilmatieteen Laitoksen mittaamaa (Kuva 5.1). Käsilaskennassa käytettiin Helsingin Kaisaniemen sääaseman ilmastotilaston 30 vuoden kuukausikeskiarvoja (33).

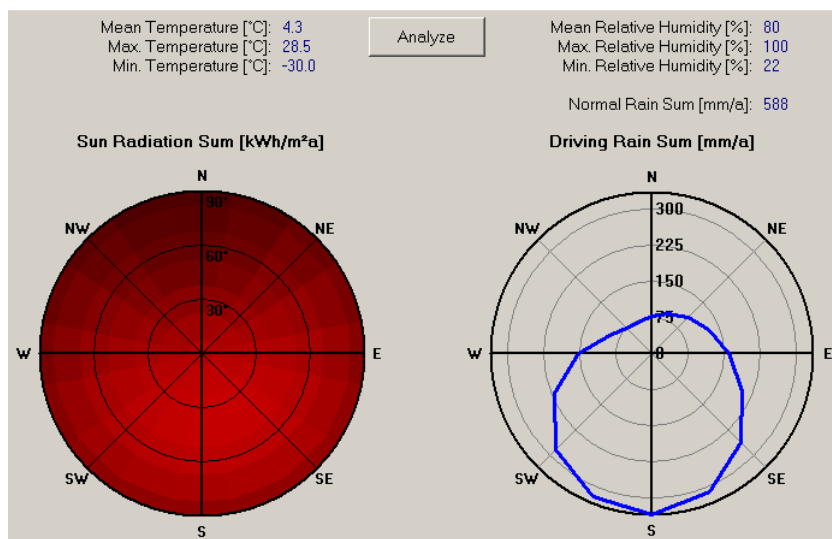


Kuva 5.1 Ulkoilman olosuhteet



Kuva 5.2 Sisäilman olosuhteet

Sisäilman olosuhteet (Kuva 5.2) määritettiin WUFI:sta saatavia ulkoilman olosuhteita mukailleen, sillä tutkimuksen kohteena oleva kellotorni on kylmää tilaa. Sisäilman olosuhteita muokattiin, kohteessa aiemmin tehtyjen sisäilman lämpötila- ja kosteusmittauksien perusteella, paremmin todellista tilannetta vastaaviksi.



Kuva 5.3 Auringon säteily ja viistosateen määrä

Julkisivupinnalle tulevan viistosateen määrän WUFI laski Helsingin säätiedostosta kohteen sijainnin ja erityisolosuhteet huomioiden (Kuva 5.3). Viistosateen määrään vaikuttivat lisävästi mm. kellotornin korkeus sekä paikan avoimuus. Seinäpinnalle tulevan viistosateen osuuden huomioon ottavaa kerrointa R2 kasvatettiin arvosta 0,2 arvoon 0,3. Tällä tavoin voitiin huomioida luonnonkiviä pitkin valuva vesi, mikä lisää rakenteen viistosaderasitusta.

Auringon säteilyn ja viistosateen vaikutus huomioitiin pintojen absorptiokertoimissa. Ulko- ja sisäpinnan pintavastuksina käytettiin WUFI:ssa oletuksena olevia arvoja (0,0588 ja 0,125). Auringon säteilyn absorptiokertoimina käytettiin rakennetyypin materiaaleille ominaisia arvoja, jotka olivat myös valmiina WUFI:ssa. Sateen absorptiokertoimeksi valittiin luonnonkivien kohdalla 0,7. Laastisaumojen viistosateen absorptiokeroainta kasvatettiin arvosta 0,7 arvoon 1. Tämä johtui siitä, että laasti huokoisena materiaalina imee lähes kaiken saumapinnalle tulevan viistosateen. Pintojen siirtokertoimet on esitetty liitteissä 1-5.

5.1.5. Alkuolosuhteet

Laskennan alkuhetken olosuhteet pyrittiin asettamaan mahdollisimman hyvin todellisia olosuhteita vastaaviksi. Rakennetyyppien US1 (vanha rakenne) ja US2 (korjattu rakenne) alkukosteudet olivat tulosten vertailtavuuden vuoksi samat. Molempien rakennetyyppien alkutilanteen lämpötilaksi asetettiin 15 °C.

Rakennetyyppien alkukosteuspitoisuudet määritettiin korjauksen jälkeistä tilannetta vastaavaksi siten, että laastin kosteuspitoisuudessa huomioitiin rakennusaikainen kosteus ja tiilen peruskosteus määritettiin ennen luonnonkivien takaisinmuurausta otettujen rakennenäytteiden perusteella. Laskennassa laastin alkukosteuspitoisuudeksi laitettiin 115 kg/m³ ja tiilen alkukosteuspitoisuutena käytettiin arvoa 60 kg/m³.

5.2. Tutkimusmenetelmät

Kaikki valitut rakennetyypit laskettiin ensin WUFI 1D-ohjelmalla tunnin aika-askeleella ja 5 vuoden tarkastelujaksolla. Tarkastelukohtana oli seinän yläosa eteläjulkisivulla. Laskennan alkuajankohta oli 1.10.2010 ja loppuajankohta 1.10.2015.

WUFI 1D laskennan tulosten perusteella laskentaa päätettiin jatkaa WUFI 2D-ohjelmalla. Tähän ratkaisuun päädyttiin 1D-ohjelmalla saatujen tulosten epäluotettavuuden johdosta. Kaikki valitut rakennetyypit laskettiin myös 2D-ohjelmalla. 2D-laskenta tehtiin tunnin aika-askeleella ja 8 vuoden tarkastelujaksolla. Laskennan alkuajankohta oli 1.10.2010 ja loppuajankohta 1.10.2018.

5.2.1. Rakennetyyppi US1

Rakennetyypissä US1 kosteusteknisiä laskentatarkasteluja tehtiin WUFI-ohjelman lisäksi vertailun vuoksi myös stationääritilassa käsin. Näin meneteltiin, jotta voitaisiin varmistua tulosten suuruusluokkien oikeellisuudesta ja rakennemallin luotettavuudesta. Tulosten vertailun helpottamiseksi haluttiin myös selvittää lähtötilanteen kosteuspitoisuudet.

Rakennetyypin US1 laskennan pääpaino oli herkkyystarkastelussa, missä määritettiin tutkittavan rakennemallin rakennepaksuudet, materiaalien kosteustekniset ominaisuudet sekä tutkittavat ilmansuunnat. Herkkyystarkastelun tuloksena tutkittavaksi ilmansuunnaksi valittiin rasisetuin suunta eli eteläjulkisivu. Rakennekerrosten massiivisuuden havaittiin lisäävän jonkin verran rakenteen kokonaiskosteuspitoisuutta, joten tästä syystä rakennemalliin valittiin massiivisin kohta tornin yläosasta, jossa viistosaderasitus on suurimmillaan. Valitut rakennepaksuudet ja materiaaliominaisuudet on esitetty taulukoissa (Taulukko 5.1 ja Taulukko 5.2).

Rakennetyyppi US1 mallinnettiin ensiksi WUFI 1D-ohjelmalla. Ongelmana rakenteen mallintamisessa 1D-ohjelmalla oli kuitenkin viistosateen imeytyminen laastisaumojen kautta. Koska 1D-ohjelmaan ei voi mallintaa laastisaumojä erikseen, luonnonkiviverhouksen laastisaumat otettiin huomioon graniitin materiaaliominaisuuksissa siten, että laastisaumojen osuus materiaaliominaisuuksissa vastasi laastisaumojen 5,5 %:n osuutta julkisivun pinta-alasta. Tästä yksinkertaistuksesta johtuen WUFI 1D-laskennan tulokset eivät kuitenkaan olleet kovin luotettavia, koska laasti ja graniitti ovat kapillaarisilta ominaisuuksiltaan täysin erilaisia materiaaleja. Tästä syystä laskentaa jatkettiin WUFI 2D-ohjelmalla.

WUFI 2D-ohjelmaan rakennemalli valittiin siten, että laskenta pysyy mahdollisimman yksinkertaisena ja nopeana. Tämän vuoksi taustamuurauksen materiaalina käytettiin tiilimuurimateriaalitiedostoa, missä oli otettu huomioon laastisaumojen osuus. Ainoastaan graniittiverhouksen laastisaumat mallinnettiin erikseen. Laskennan raja-arvoja tarkistettiin hieman WUFI 2D-laskennan aikana, jotta alkutilanteen kosteuspitoisuus saatiin mahdollisimman lähelle todellista tilannetta (ks. luku 5.1).

5.2.2. Rakennetyyppi US2

Rakennetyypin US2 laskentatarkastelut suoritettiin vaiheittain käyttäen sekä käsilaskentaa että WUFI-ohjelmaa. Lähtötietoina käytettiin rakennetyypin US1 herkkyystarkastelussa valittua tapausta siten, että laastityyppi vaihdettiin vastaamaan paremmin korjattua rakennetta. Rakenteen laskentamalliin lisättiin myös lämmityskaapelit ja tuuletuskanavisto.

Erilaiset tutkimustapaukset valittiin lämmitystehon perusteella. Tarkoituksena oli vertailla eri lämmityksen säätöjen vaikutusta rakenteen kosteustilaan ja määrittellä tapaus, jossa kosteutta kertyy rakenteeseen mahdollisimman vähän. Lämmityksen säätöä tutkittiin aluksi kolmella eri säätöteholla: 0, 25 sekä 80 kW. Lämmityskauden pituudeksi asetettiin 1.4 -30.11 ja talvella rakenteen annettiin jäätyä. Lämmityskauden ajoitus tapahtui siten, että rakenteeseen tulee mahdollisimman vähän pakkasrapautumista aiheuttavia jäätymis-sulamissyklejä. Lämmitys huomioitiin syöttämällä WUFI:iin ylimääräinen lämmönlähde W/m. Näin pystyttiin huomioimaan vuodenaikojen mukaan tapahtuva lämmönsäätelyn vaihtelu. Tarvittavat lähtötiedot lämmityksen huomioimiseen (lämmityksen laskennallinen maksimiteho W/m) saatiin sähkösuunnittelijalta (34). Lopuksi lämmityksen säätöä tutkittiin vielä määrittämällä optimitapaus, jossa rakenne kuivuu mahdollisimman paljon, lämmityksen ollessa mahdollisimman pieni. Tämä tapahtui siten, että lämmitys säädettiin maksimiteholle tutkittavan vuodenajan kohdalle ja 1/3 teholla muiden vuodenaikojen kohdalle. Näin voitiin tutkia miten eri vuodenajat vaikuttavat lämmityksen säätöön.

Rakennetyypin US2 kuivumista tutkittiin ensiksi mallintamalla WUFI 1D:hen tuuletusväli, jonka ilmatilavuus asetettiin samaksi kuin tuuletuskanaviston ilmatilavuus. Ilmavirtaukset tuuletuskanavistossa laskettiin käsin luvussa 4.6.2 esitetyn teorian mukaan ja syötettiin WUFI 1D:hen ilmanvaihtona, joka ottaa huomioon kosteuden haihtumisen tuuletusvälistä. Ilmanvaihdossa otettiin huomioon lämmönsäätelyn vaihtelusta aiheutuvat virtausnopeuksien muutokset niin, että jokaiselle lämmitysteholle laskettiin oma virtausnopeus. Ilmavirtauksien määrittämiseksi laskettiin ensin WUFI 1D:llä lämpötilat sekä suhteelliset kosteudet tuulettumattomassa rakenteessa. Saaduista tuloksista laskettiin kuukausikeskiarvoilla ilman virtausnopeudet tuuletuskanavistossa, minkä jälkeen laskentaa jatkettiin syöttämällä WUFI:iin ilmanvaihto (1/h) seuraavan kaavan mukaisesti:

$$n = \frac{R_a \cdot 3600}{V} \quad (5.1)$$

missä

V = tuuletuskanaviston ilmatilavuus (m^3)

R_a = ilman tilavuusvirta tuuletuskanavistossa (m^3/s)

Tuuletuskanavan kautta poistuvan kosteuden ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) WUFI laski lisätyn ilmanvaihdon perusteella kaavasta (35):

$$g = \frac{n}{3600} \cdot d_{vent} \cdot (v_e - v_{vent}) \quad (5.2)$$

missä

n = ilmanvaihto tuuletusurassa (1/h)

d_{vent} = ilmaraon leveys (m)

v_e = ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m^3)

v_{vent} = ilmaraon vesihöyrypitoisuus (kg/m^3)

WUFI 1D-laskennan tulosten luotettavuutta heikensi kuitenkin graniittiverhouksen mallintamisessa tehdyt yksinkertaistukset. Lisäksi virhettä aiheutti tuuletuskanaviston mallintaminen yhtenäisenä tuuletusvälinä, jolloin tuuletusväli esti kosteuden kapillaarisen kulkeutumisen tiilimuuriin. Kaiken kaikkiaan tuloksista pääteltiin että rakenteen mallintaminen 1D-ohjelmalla ei yksin riitä, vaan lopullisia tuloksia varten tarvitaan tarkempia sekä luotettavampia laskentamenetelmiä. Tästä syystä laskentaa jatkettiin WUFI 2D-ohjelmalla.

Laskennan nopeuttamiseksi WUFI 2D-rakennemalli tehtiin mahdollisimman yksinkertaiseksi, eli rakenteeseen mallinnettiin yksi pystykanava ja yksi laastisauma liitteiden 2-5 osoittamalla tavalla. Ilmanvaihto ja lämmitys otettiin huomioon samoilla periaatteilla kuin 1D-ohjelmalla suoritetuissa laskelmissa. Rakennetyypin US2 eri lämmityksen säätötapaukset olivat samat kuin WUFI 1D-laskennassa. Ilmavirtauksien nopeuksia kuitenkin tarkistettiin WUFI 2D laskennan lämpötiloja vastaaviksi. Muut lähtötiedot valittiin WUFI 2D tapauksen US1 perusteella.

Vertailun vuoksi rakennetyyppi US2 tutkittiin myös käsilaskennalla stationääritilassa. Käsilaskennan tarkoituksena oli varmistaa tulosten suuruusluokkien oikeellisuus sekä samansuuntaisuus WUFI:lla laskettuihin tuloksiin verrattuna. Laskenta suoritettiin luvussa 4.6 esitetyn teorian mukaan.

6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

6.1. Kosteusteknisen tarkastelun tulokset

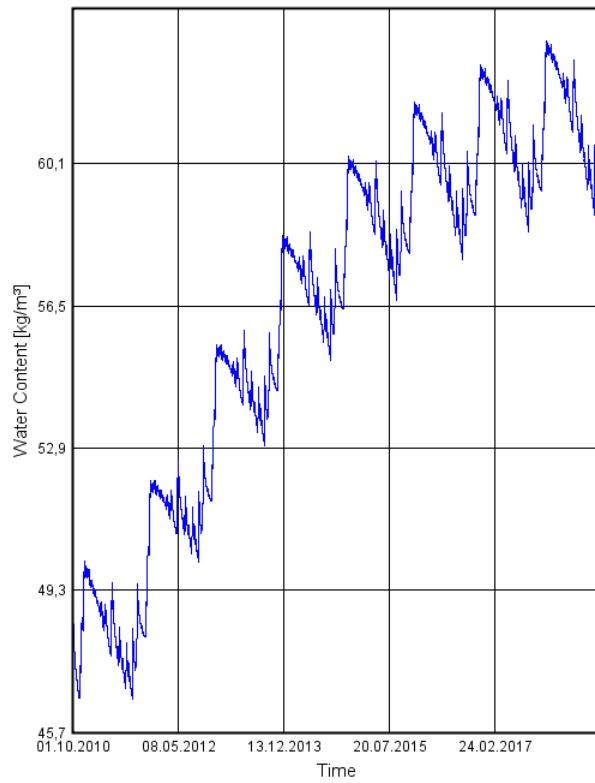
Kaikki valitut rakennetyypit laskettiin WUFI-ohjelmalla. Laskentaa täydennettiin soveltuvin osin käsilaskennalla ja lisäksi tehtiin tarkastuslaskelmia käsilaskennalla. Tarkemmin tutkimusmenetelmiä on käsitelty luvussa 5.2. Tässä luvussa esitetään näiden laskelmien tärkeimmät tulokset tarkasteluineen siinä järjestyksessä kuin ne suoritettiin.

6.1.1. Rakennetyyppi US1

Rakennetyyppi US1 kuvaa vanhaa rakennetta eli rakennetta sellaisena kuin se oli ennen korjausta. Vanha rakenne ei ole tuuletettu eikä siinä ole lämpökaapelointia. Laastityyppinä on käytetty kalkkilaastia.

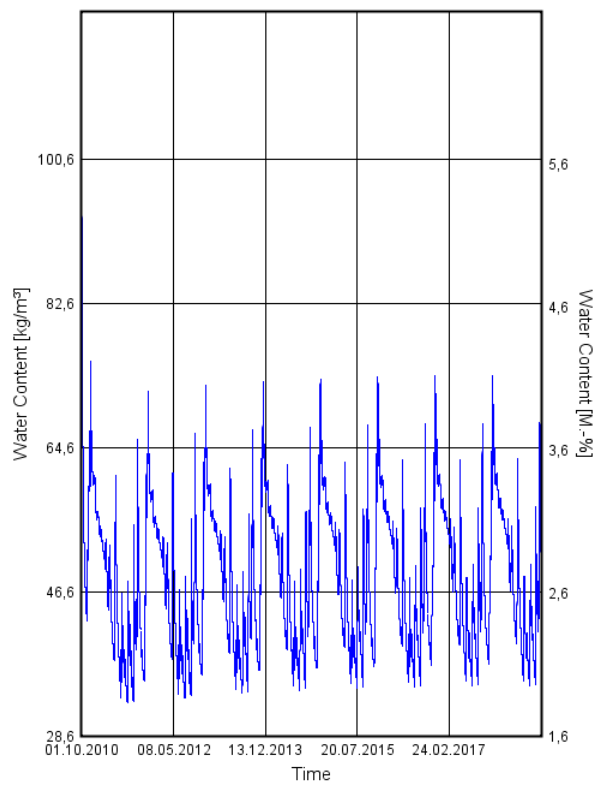
Rakenteen mallinnus WUFI 2D-ohjelmalla tehtiin luvussa 5 esitettyjen periaatteiden mukaan. Ensiksi tutkittiin vanhan rakenteen kosteuspitoisuuksia ja haettiin laskennan raja-arvot. Tarkemmat tiedot laskennan vaiheista ja materiaaliominaisuuksista ovat esitettyinä luvussa 5.

Rakennetyypin US1 kokonaiskosteuspitoisuus on kasvava. Kokonaiskosteuspitoisuus valituilla alkuolosuhteilla kasvaa nopeasti heti laskennan alussa ja 8 vuoden kuluttua kokonaiskosteuspitoisuuskäyrä on melkein tasaantunut. Tasapainotilanteessa kokonaiskosteuspitoisuuden vaihtelu on luokkaa 60–64 kg/m³ (Kuva 6.1). Laastin kosteuspitoisuus tasaantuu jo ensimmäisen vuoden aikana tasolle 40–70 kg/m³ ja tiilimuurin kosteuspitoisuus tasaantuu 8 vuoden jälkeen välille 85–90 kg/m³ (Kuva 6.2 ja Kuva 6.3). Vertailun vuoksi tutkittiin myös tiilimuurin ulko-osan (noin 150 mm) kosteuspitoisuuksia (Kuva 6.4). Tiilimuurin ulko-osalla kosteuspitoisuudet ovat keskimääräisiä arvoja korkeammalla (110–115 kg/m³).

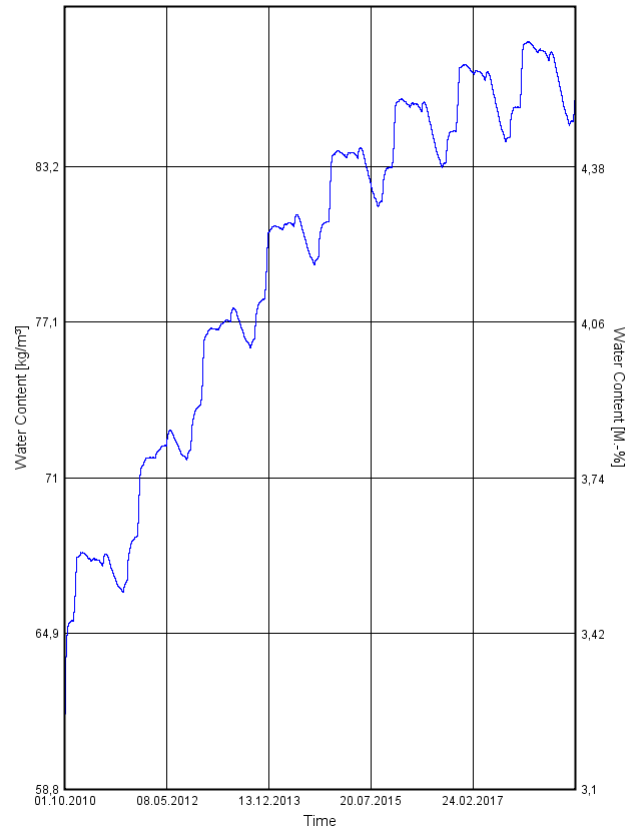


Kuva 6.1 Rakennetyypin US1 kokonaiskosteuspitoisuus

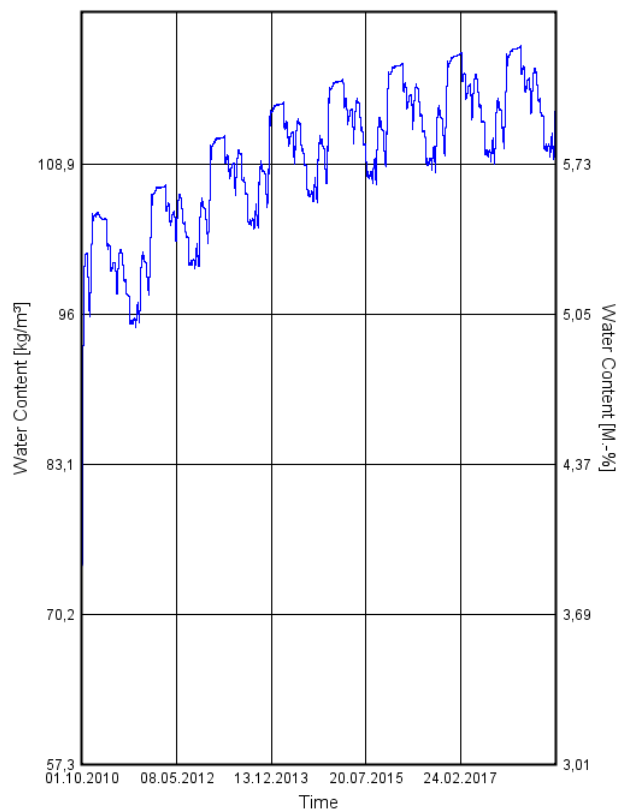
Kosteuspitoisuus kalkkilaasti



Kuva 6.2 Sauma- ja taustalaastikerroksen keskimääräinen kosteuspitoisuus rakennetyypissä US1.

Kosteuspitoisuus tiilimuuri

Kuva 6.3 Tiilimuurin keskimääräinen kosteuspitoisuus rakennetyypissä US1.

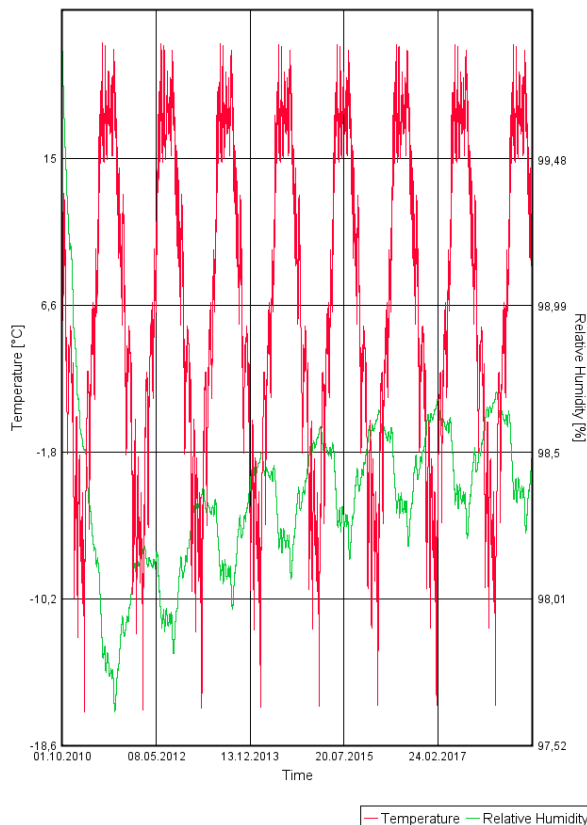
Kosteuspitoisuus tiilimuurin ulko-osa

Kuva 6.4 Tiilimuurin ulko-osan kosteuspitoisuus rakennetyypissä US1.

Rakenteen lämpötilajakauman (Kuva 6.5 ja Kuva 6.6) perusteella rakennetyypin US1 lämpötilat jäävät melko matalalle tasolle. Tuloksista selviää, että lämpötilat jäävät kesälläkin alle 20 °C (vaihteluväli 15–22°C). Tämä johtuu siitä että tornin sisätila on kylmää tilaa ja auringon säteilyn vaikutus ei riitä nostamaan taustalaastikerroksen lämpötiloja. Tuloksiin vaikuttaa myös se että WUFI-ohjelma käyttää laskennassa ulkoilman keskiarvolämpötiloja, jolloin kesän sekä talven lämpötilat eivät saavuta huippulukemia. Tämä saattaa aiheuttaa virhettä lyhyellä aikavälillä, mutta pidemmän ajanjakson tarkasteluissa (kuten tässä työssä) virheiden mahdollisuus pienenee.

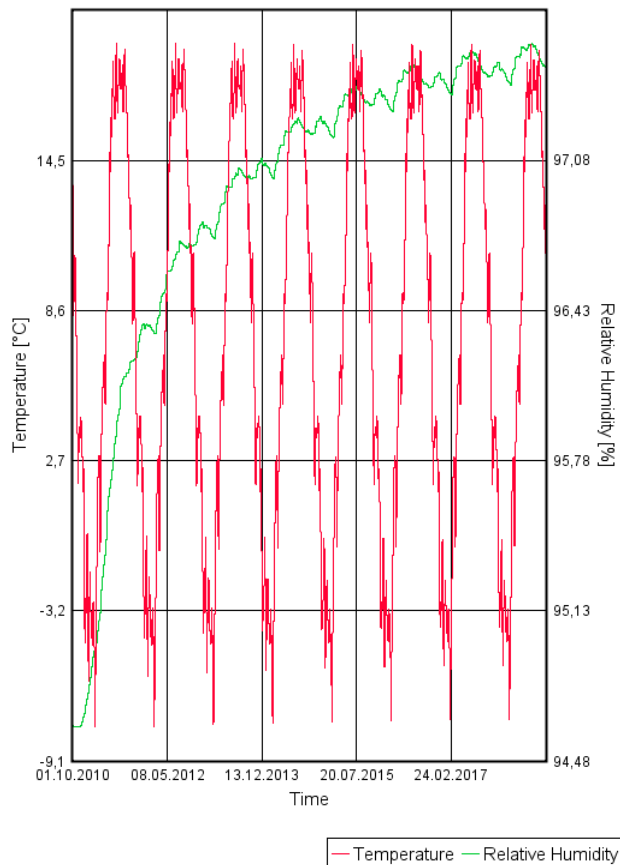
Rakennekerrosten suhteelliset kosteudet ovat hyvin erilaiset (Kuva 6.5 ja Kuva 6.6). Taustalaastikerroksessa suhteellinen kosteus laskee ensin rakennusaikaisen kosteuden poistuttua rakenteesta. Tämän jälkeen suhteellinen kosteus alkaa kohota uudelleen. Taustalaastikerroksen suhteellinen kosteus on suurimmillaan talvella ja pienimmillään kesällä. Tiilimuurissa suhteellinen kosteus nousee koko laskentajakson ajan noudattaen tiilimuurin kosteuspositoisuuskäyrää. Suhteellisen kosteuden vaihtelu tiilimuurissa noudattaa lämpötilakäyrää, eli on suurimmillaan kesällä ja pienimmillään talvella. Molempien rakennekerrosten suhteelliset kosteudet ovat kapillaarisella alueella (>97 % RH) laskennan lopussa.

T ja RH kalkkilaasti



Kuva 6.5 Lämpötila ja suhteellinen kosteus taustalaastikerroksen keskellä rakennetyypissä US1.

T ja RH tiilimuuri



Kuva 6.6 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tiilimuurin keskellä rakennetyypissä US1.

Tuloksia voidaan pitää luotettavina, koska rakennemallin geometria on hyvin lähellä todellista tilannetta (graniittiverhouksen laastisaumat on mallinnettu erikseen) ja laskennan raja arvot ovat rakennuksen sijaintia vastaavat. Jonkin verran virhettä voivat aiheuttaa tiilimuurissa sekä sauma- ja taustalaastissa käytetyt materiaalit, joiden materiaaliominaisuuksissa on käytetty WUFI:n kirjastomateriaaleilla olevia ominaisuuksia. Näistä laastisaumojen osuus on merkittävin, koska laastisaumojen kautta imeytyy kaikki viistosade rakenteeseen. Kaiken kaikkiaan tuloksia voidaan kuitenkin pitää niin luotettavina, että korjatun rakenteen lämmityksen säätöä voidaan tutkia valituilla materiaaliominaisuuksilla.

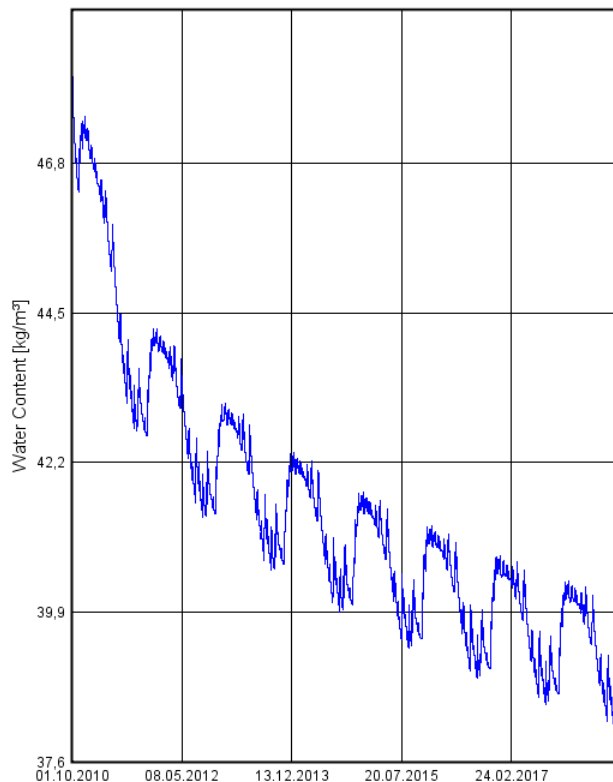
6.1.2. Rakennetyyppi US2_0

Rakennetyyppi US2_0 kuvaa korjattua rakennetta, johon on asennettu tuuletuskanavisto taustalaastikerrokseen. Vanhasta rakenteesta poiketen, laastityyppinä on käytetty kalkkisementtilaastia. Lämpökaapelointia tässä tapauksessa ei ole, vaan malli kuvaa aikaisemmissa kohteissa käytössä ollutta rakennetyyppeä. Muut lähtötiedot valittiin tapauksen US1 perusteella.

Laskenta suoritettiin vaiheittain luvun 5.2.2 mukaisessa järjestyksessä. Ensimmäisessä vaiheessa laskettiin tuuletuskanaviston lämpötilajakauma. Saaduista tuloksista laskettiin virtausnopeus tuuletuskanavistossa (liite 7). Tuloksena saatiin tuuletuskana-

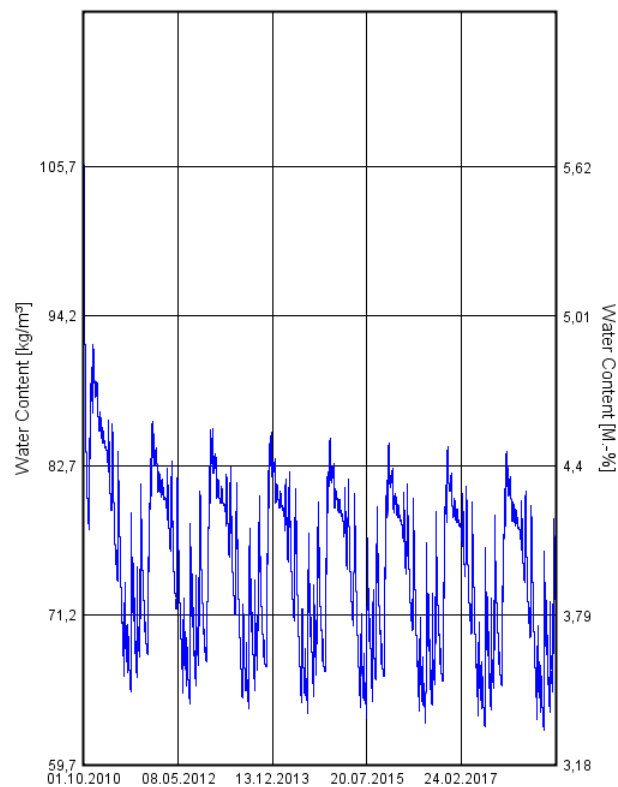
van virtausnopeudeksi 0,002 m/s, kun rakenne ei ole lämmitetty. Lopuksi suoritettiin varsinainen laskenta.

Rakennetyypin US2_0 kokonaiskosteuspitoisuuskäyrä on laskeva. Kokonaiskosteuspitoisuus laskee koko 8 vuoden laskentajakson ajan ja asettuu tasapainotilassa lukemiin noin 38–40 kg/m³ (Kuva 6.7). Laastin kosteuspitoisuus laskee melko nopeasti välille 65–83 kg/m³ (Kuva 6.8). Tiilimuurin kosteuspitoisuus saavuttaa 8 vuoden laskentajakson aikana 50–51 kg/m³ vaihteluvälin, josta kosteuspitoisuus jatkaa vielä hieman laskua (Kuva 6.9). Tiilimuurin ulko-osalla kosteuspitoisuudet olivat kuitenkin huomattavasti keskimääräisiä arvoja korkeammalla (Kuva 6.10). Laskennan lopussa kosteuspitoisuudet olivat lukemissa 75–77 kg/m³ tiilimuurin uloimmalla neljänneksellä.



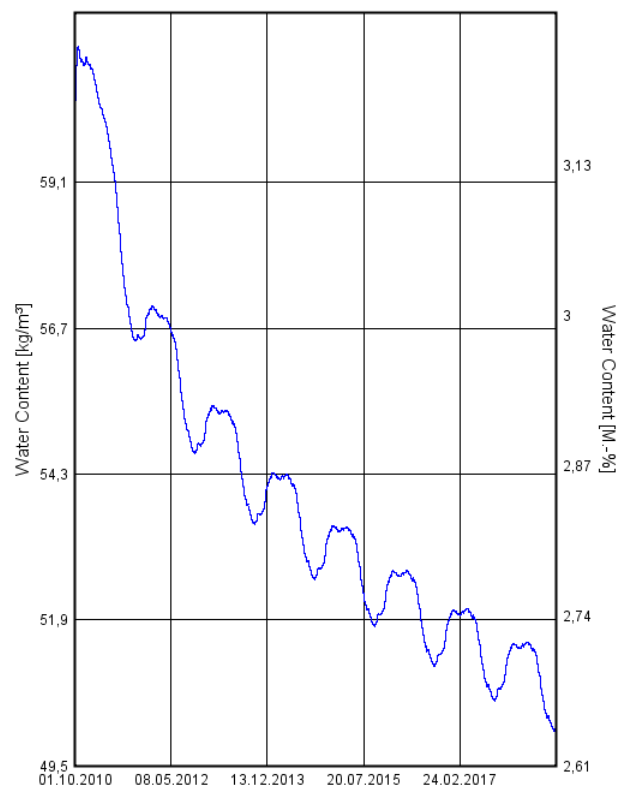
Kuva 6.7 Rakennetyypin US2_0 kokonaiskosteuspitoisuus.

Kosteuspitoisuus kalkkisementtilaasti



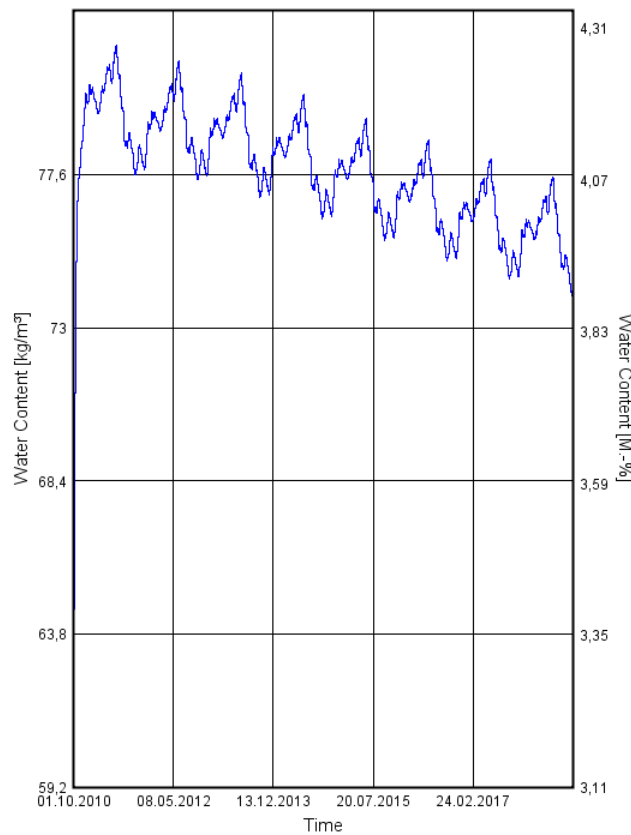
Kuva 6.8 Sauma- ja taustalaastikerroksen keskimääräinen kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_0.

Kosteuspitoisuus tiilimuuri



Kuva 6.9 Tiilimuurin keskimääräinen kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_0.

Kosteuspitoisuus tiilimuurin ulko-osa

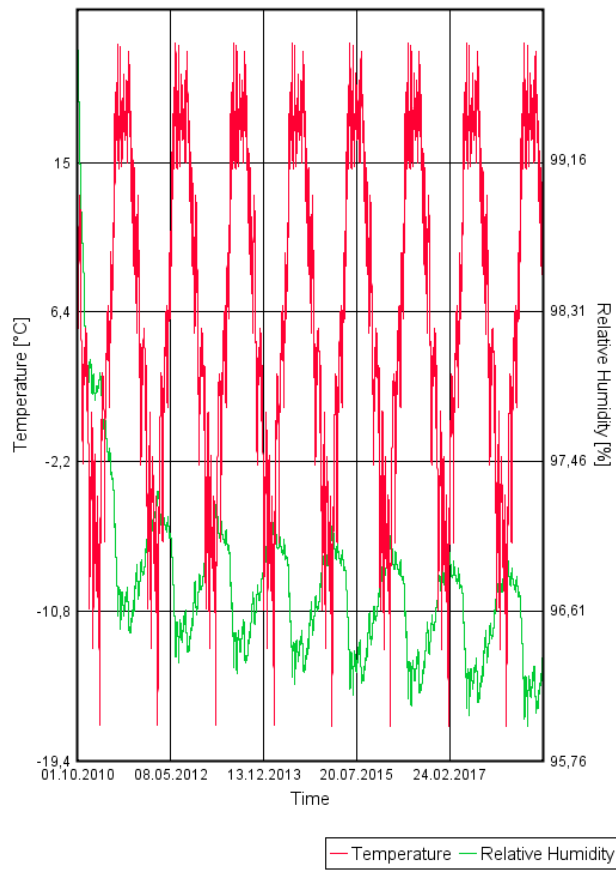


Kuva 6.10 Tiilimuurin ulko-osan kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_0.

Lämpötiloiltaan rakennetyppi US2_0 ei juuri eroa vanhasta rakenteesta (US1). Kuviasta (Kuva 6.11 ja Kuva 6.12) nähdään, että rakenteen lämpötilat asettuvat kesällä 15–20 °C tienoille. Talvella lämpötilat vaihtelevat lukemissa -5...-15 °C.

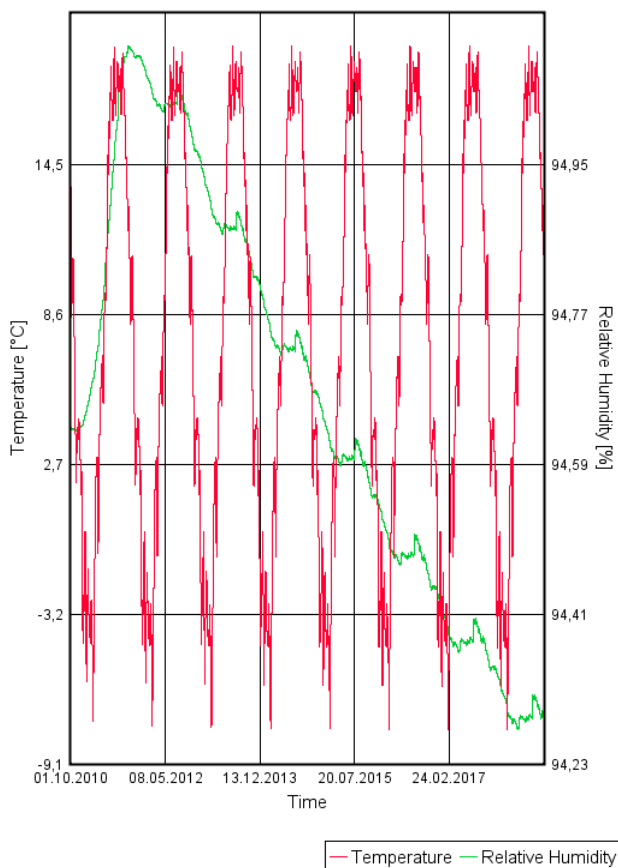
Rakennetyypin suhteelliset kosteudet poikkeavat melko paljon vanhasta rakenteesta. Taustalaastikerroksen suhteellinen kosteus laskee ensimmäisen vuoden ajan voimakkaasti ja tasaantuu laskentajakson loppua kohti (Kuva 6.11). Suhteellinen kosteus taustalaastissa on suurimmillaan talvella ja pienimmillään kesällä. Tiilimuurin suhteellinen kosteus nousee ensimmäisen vuoden ajan ja kääntyy tämän jälkeen laskuun (Kuva 6.12). Suhteellinen kosteus on suurimmillaan kesällä ja pienimmillään talvella. Molemmissa rakennekerroksissa suhteellinen kosteus on laskennan lopussa noin 95 % RH.

T ja RH kalkkisementtilaasti



Kuva 6.11 Lämpötila ja suhteellinen kosteus taustalaastikerroksen keskellä rakennetyypissä US2_0.

T ja RH tiilimuuri



Kuva 6.12 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tiilimuurin keskellä rakennetyypissä US2_0.

Tuloksia voidaan pitää melko luotettavina, koska rakennemalli (graniittiverhouksen laastisaumat sekä tuuletuskanavisto) sekä laskennan raja-arvot ovat hyvin lähellä todellista tilannetta. Virhettä tuloksiin voi aiheuttaa laastikerroksen sekä tiilimuurin materiaaliominaisuudet, kuten rakennetyypissä US1. Näiden lisäksi virhettä aiheuttaa ilman virtausnopeus tuuletuskanavistossa. Laskelmissa virtausnopeus on huomioitu keskiarvotapauksena, joka on vakio koko vuoden. Todellisuudessa virtausnopeudet vaihtelevat jatkuvasti ulkoilman olosuhteiden vaihdelleessa. Koska rakennetyypissä US2_0 ilman virtausnopeudet ovat pienet, virheen suuruus ei ole merkittävä kokonaisuuden kannalta.

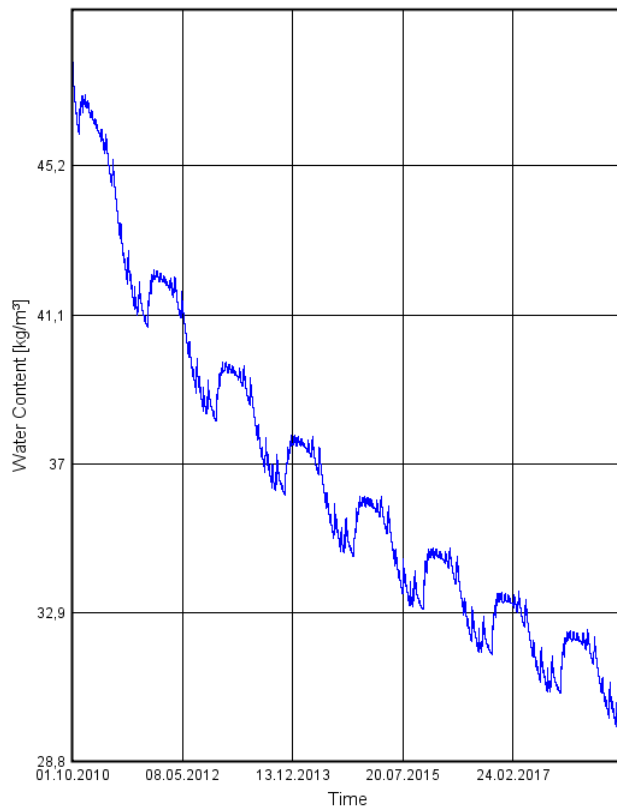
6.1.3. Rakennetyyppi US2_1

Rakennetyyppi US2_1 kuvaa korjattua rakennetta, johon on asennettu sekä tuuletuskanavisto että lämpökaapelointi taustalaastikerrokseen. Laastityyppinä käytettiin samaa kalkkisementtilaastia kuin tapauksessa US2_0. Rakennetyypin US2_1 lämmitys säädettiin 1/3 tehoon ja lämmityskauden pituudeksi asetettiin 1.4.–30.11. Talvella lämmitys oli pois päältä.

Korjatun, 1/3 teholla lämmitetyn rakenteen laskenta suoritettiin samoilla periaatteilla kuin rakennetyypissä US2_0. Lisätyn lämmityksen perusteella saatiin rakenteen lämpötila sekä suhteellinen kosteus tuuletuskanavistossa. Näiden tulosten perusteella lasket-

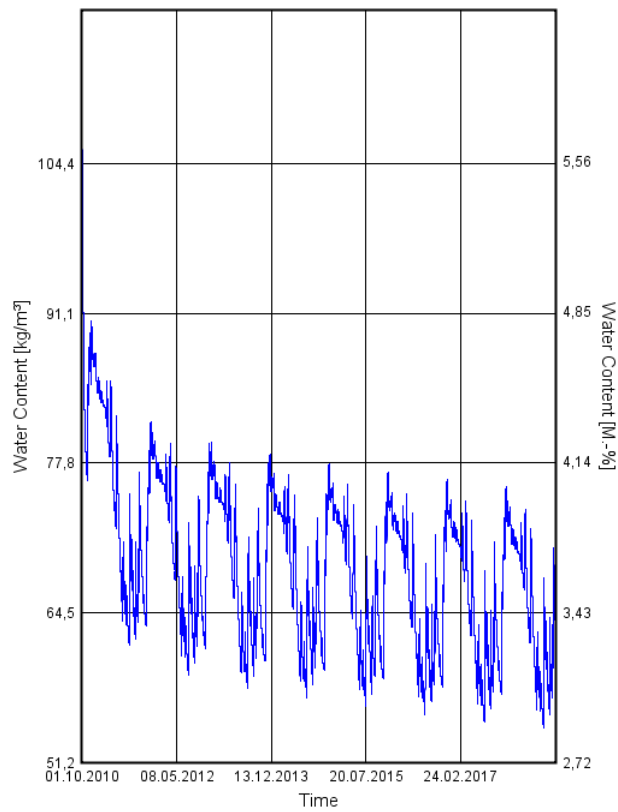
tiin tuuletuskanaviston virtausnopeudeksi 0,006 m/s, kun rakennetta lämmitetään 1/3 teholla (liite 7). Virtausnopeus on noin 3 kertaa suurempi kuin tapauksessa US2_0. Lämpötilan nousu tuuletuskanavistossa oli tällöin noin 4°C. Talvella virtausnopeutena käytettiin arvoa 0,002 m/s.

Kuvassa (Kuva 6.13) on esitettyä rakennetyypin US2_1 kokonaiskosteuspitoisuuden kehittyminen 8 vuoden laskenta-ajanjakson aikana. Kokonaiskosteuspitoisuus laskee koko 8 vuoden laskentajakson ajan. Jakson lopussa vuosittainen vaihteluväli on laskenut lukemiin 30–32 kg/m³ ja käyrä on yhä edelleen laskeva. Taustalaastikerroksen kosteuspitoisuudessa ei tapahdu juurikaan muutoksia ensimmäisen vuoden jälkeen, mutta tiilimuurin kosteuspitoisuus laskee samanaikaisesti kokonaiskosteuspitoisuuden kanssa (Kuva 6.14 ja Kuva 6.15). Tiilimuurin ulko-osalla kosteuspitoisuus on hieman keskimääräistä korkeampi (Kuva 6.16).



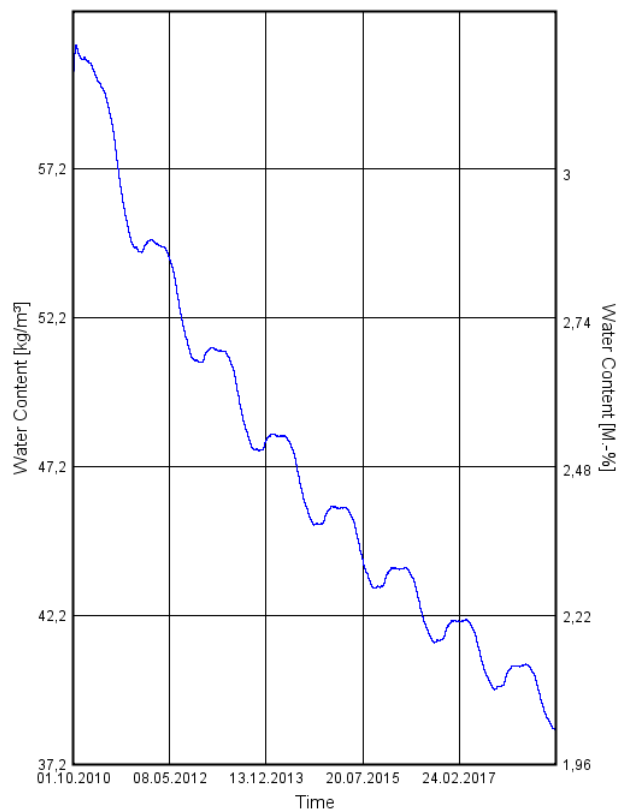
Kuva 6.13 Rakennetyypin US2_1 kokonaiskosteuspitoisuus.

Kosteuspitoisuus kalkkisementtilaasti



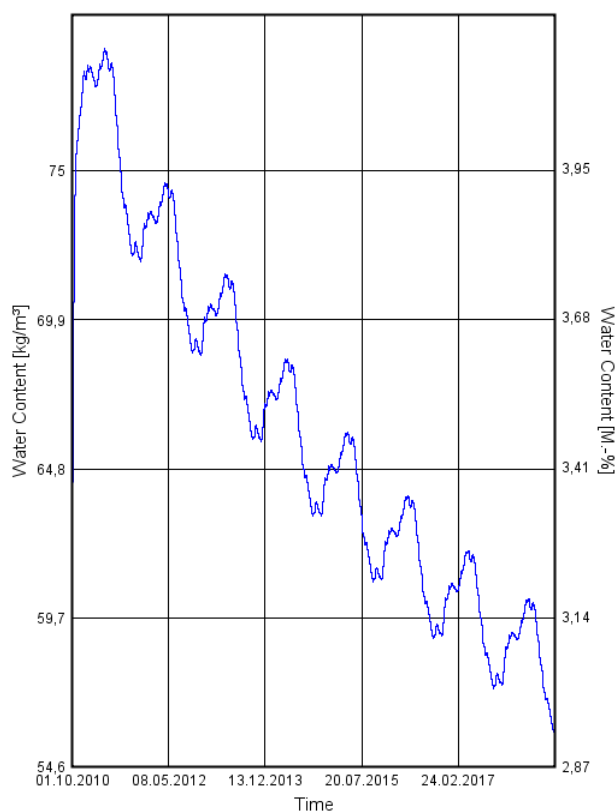
Kuva 6.14 Sauma- ja taustalaastikerroksen keskimääräinen kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_1.

Kosteuspitoisuus tiilimuuri



Kuva 6.15 Tiilimuurin keskimääräinen kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_1.

Kosteuspitoisuus tiilimuurin ulko-osa

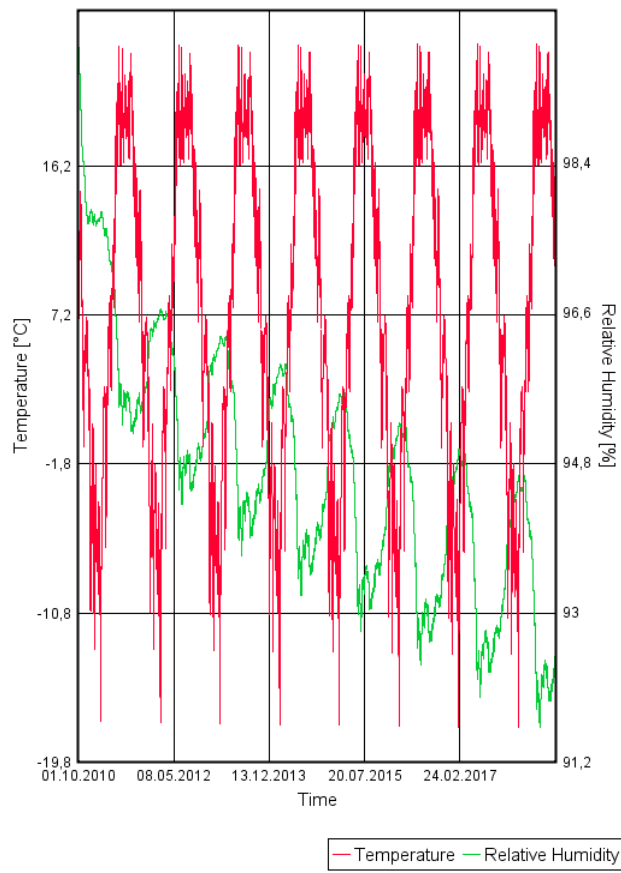


Kuva 6.16 Tiilimuurin ulko-osan kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_1.

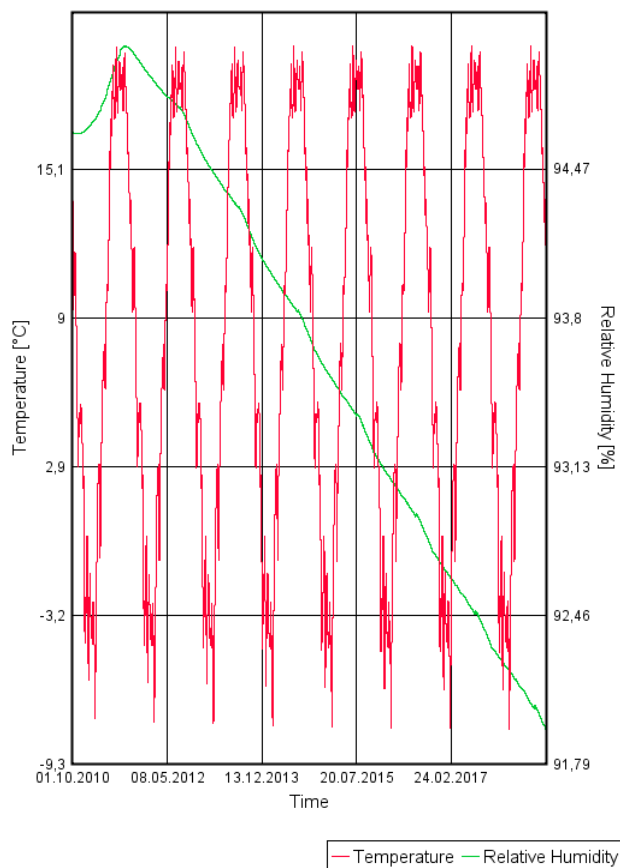
Rakennetyypin US2_1 lämpötilat ovat lämmittämätöntä tapausta korkeammalla. Kesällä rakenteen lämpötilat vaihtelevat lukemissa 17–24°C. Lisäystä lämmittämättö-
mään tapaukseen (US2_0) on noin 3 °C (Kuva 6.17). Tiilimuurin lämpötilat jäävät hie-
man alemmas (Kuva 6.18).

Suhteelliset kosteudet rakennetyypissä US2_1 muistuttavat lämmittämätöntä tapaus-
ta (US2_0), mutta käyrät laskevat voimakkaammin. Laskentajakson lopussa suhteelli-
nen kosteus on laskenut molemmissa rakennekerroksissa arvoon 92 % RH (Kuva 6.17
ja Kuva 6.18).

T ja RH kalkkisementtitaasti



Kuva 6.17 Lämpötila ja suhteellinen kosteus taustalaastikerroksen keskellä rakennetyypissä US2_1.

T ja RH tiilimuuri

Kuva 6.18 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tiilimuurin keskellä rakennetyypissä US2_1.

Tuloksia voidaan pitää melko luotettavina, koska rakennemalli (graniittiverhouksen laastisaumat, tuuletuskanavisto ja lämpökaapelit) sekä laskennan raja-arvot ovat hyvin lähellä todellista tilannetta. Virhettä tuloksiin voi jonkin verran aiheuttaa laastikerroksen sekä tiilimuurin materiaaliominaisuudet, kuten rakennetyypissä US1 ja US2_0. Näiden lisäksi virhettä voi aiheuttaa ilman virtausnopeudet tuuletuskanavistossa. Laskelmissa virtausnopeus on huomioitu keskiarvotapauksena, joka vaihtuu lämmityksen säädön mukaan. Todellisuudessa virtausnopeudet vaihtelevat jatkuvasti ulkoilman olosuhteiden mukaan. Laskentajakson pituus kuitenkin tasaa tätä keskiarvolukemista johtuvaa virheen mahdollisuutta.

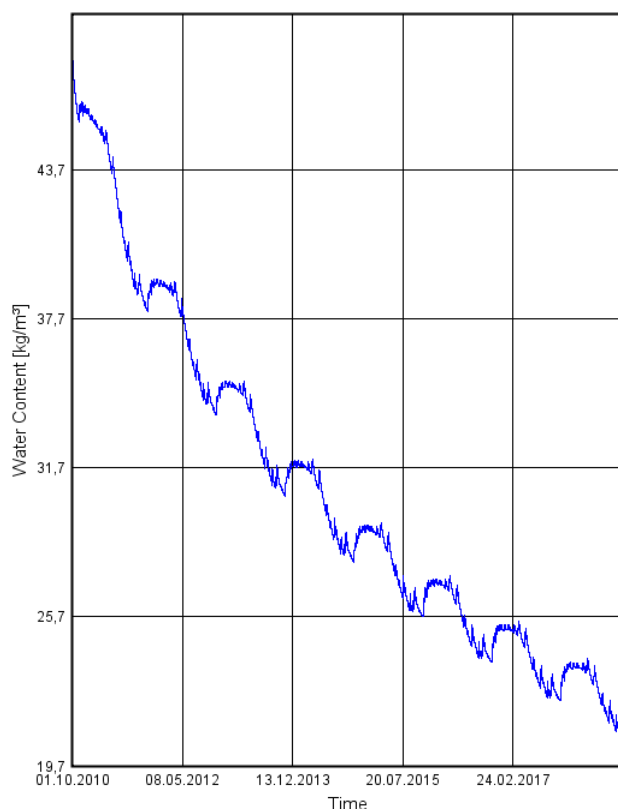
6.1.4. Rakennetyyppi US2_3

Rakennetyyppi US2_3 kuvaa korjattua, tuuletettua sekä lämmitettyä rakennetta. Lämmitys säädettiin maksimiteholla aikavälille 1.4.–30.11 ja 0-teholla aikavälille 1.12–31.3. Muut ominaisuudet olivat vastaavat kuin rakennetyypeissä US2_0 ja 1.

Korjatun, maksimiteholla lämmitetyn rakenteen laskenta suoritettiin samalla periaatteella kuin rakennetyypeissä US2_0 ja 1. Lisätyn lämmityksen perusteella määritettiin ensiksi rakenteen lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden kuvaajat tuuletuskanavistossa. Näiden tulosten perusteella laskettiin tuuletuskanaviston virtausnopeudeksi 0,011 m/s,

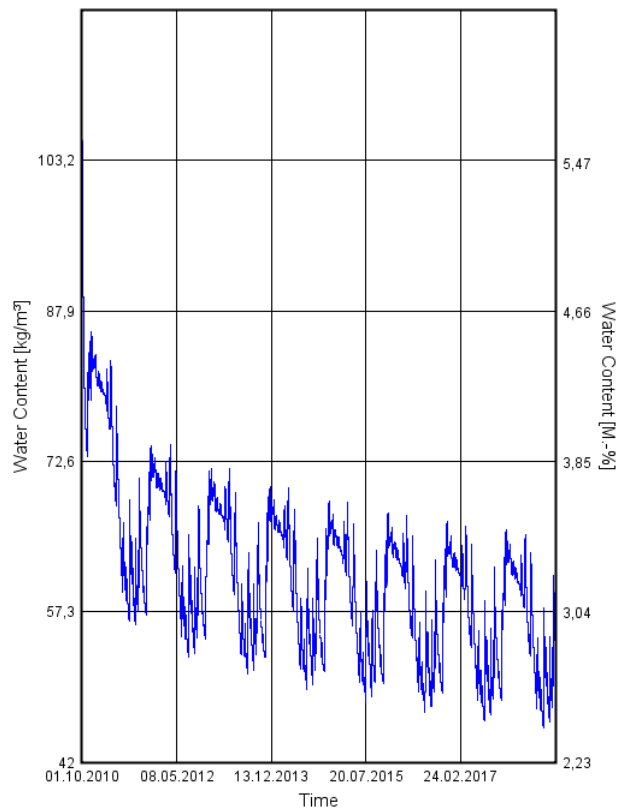
kun rakennetta lämmitetään maksimiteholla. Virtausnopeus on noin 5-6 kertaa suurempi kuin tapauksessa US2_0. Lämpötilan nousu tuuletuskanavistossa oli noin 8°C. Talvikauden ajaksi virtausnopeus säädettiin arvoon 0,002 m/s.

Rakennetyypin US2_3 kokonaiskosteuspitoisuuden kuvaaja (Kuva 6.19) on voimakkaasti laskeva koko tarkastelujakson (8 v.) ajan, mutta kuvaajassa on kuitenkin havaittavissa pientä tasaantumista laskennan lopussa. Rakenteen kokonaiskosteuspitoisuus on tarkastelujakson lopussa laskenut lukemiin 21–23 kg/m³. Laastikerroksen sekä tiilimuurin kosteuspitoisuudet ovat tällöin 45–60 kg/m³ sekä 25–26 kg/m³ (Kuva 6.20 ja Kuva 6.21). Tiilimuurin uloimman osan kosteuspitoisuus on laskennan lopussa laskenut lukemiin 35–40 kg/m³ (Kuva 6.22).



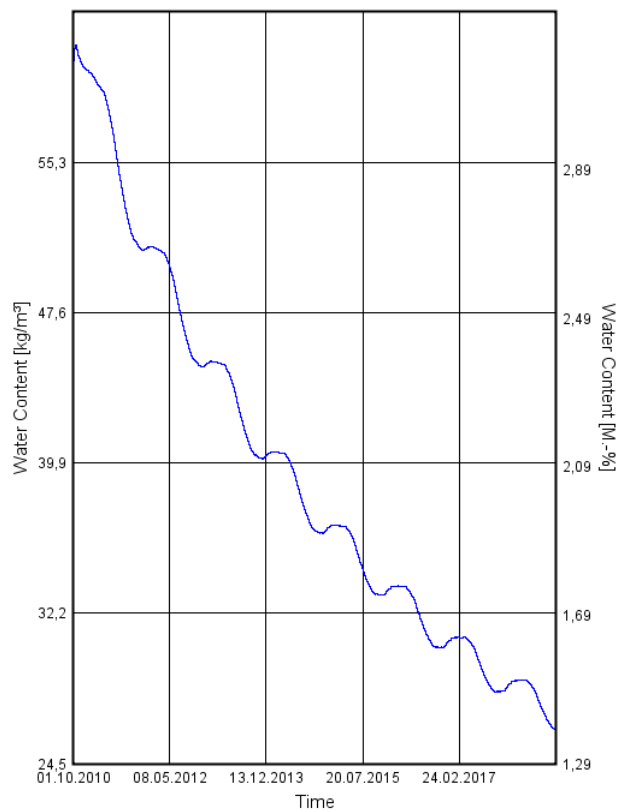
Kuva 6.19 Rakennetyypin US2_3 kokonaiskosteuspitoisuus.

Kosteuspitoisuus kalkkisementtilaasti



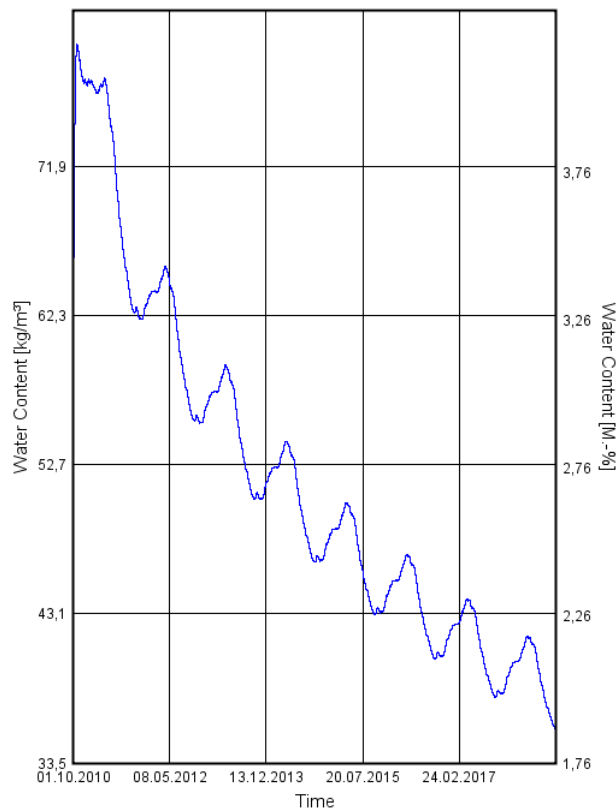
Kuva 6.20 Sauma- ja taustalaastikerroksen keskimääräinen kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_3.

Kosteuspitoisuus tiilimuuri



Kuva 6.21 Tiilimuurin keskimääräinen kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_3.

Kosteuspitoisuus tiilimuurin ulko-osa

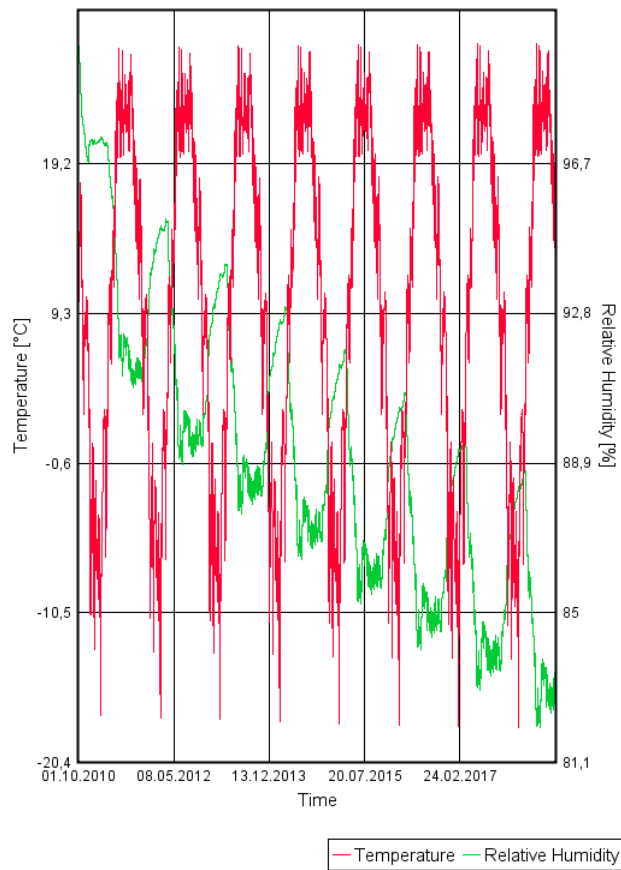


Kuva 6.22 Tiilimuurin ulko-osan kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_3.

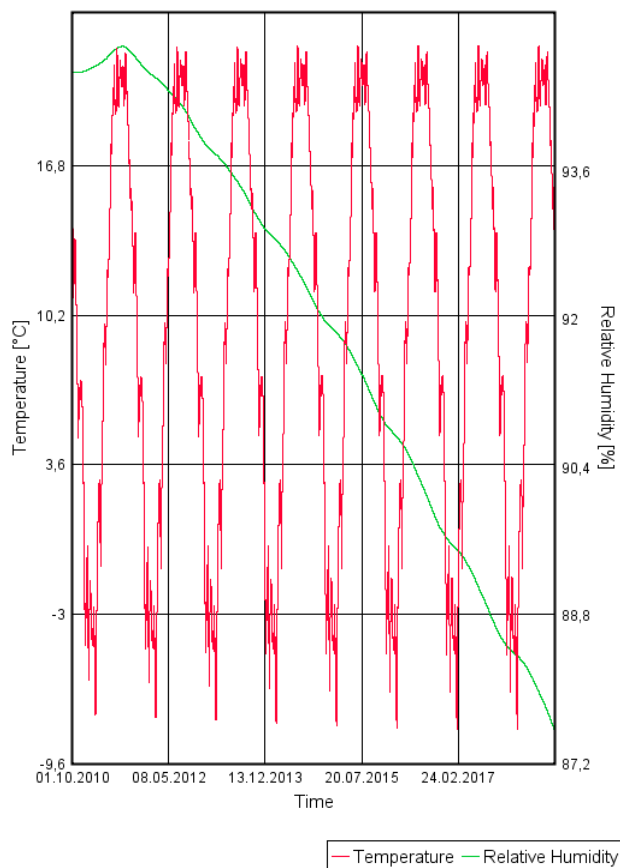
Rakenteen lämpötilat maksimilämmityksellä vaihtelevat kesällä 20–27 °C välillä (Kuva 6.23). Tämä on noin 6 °C enemmän kuin tapauksessa US2_0. Tiilimuurin keski-osassa lämpötilat jäävät jonkin verran alemmas (Kuva 6.24).

Suhteelliset kosteudet maksimilämmityksellä lämmitettäessä muistuttavat 1/3 lämmitystapausta, mutta käyrät laskevat voimakkaammin. Laskentajakson lopussa suhteellinen kosteus on laskenut taustalaastikerroksessa arvoon 82 % RH ja tiilimuurissa arvoon 87 % RH (Kuva 6.23 ja Kuva 6.24).

T ja RH kalkkisementttilaasti



Kuva 6.23 Lämpötila ja suhteellinen kosteus taustalaastikerroksen keskellä rakennetypissä US2_3.

T ja RH tiilimuuri

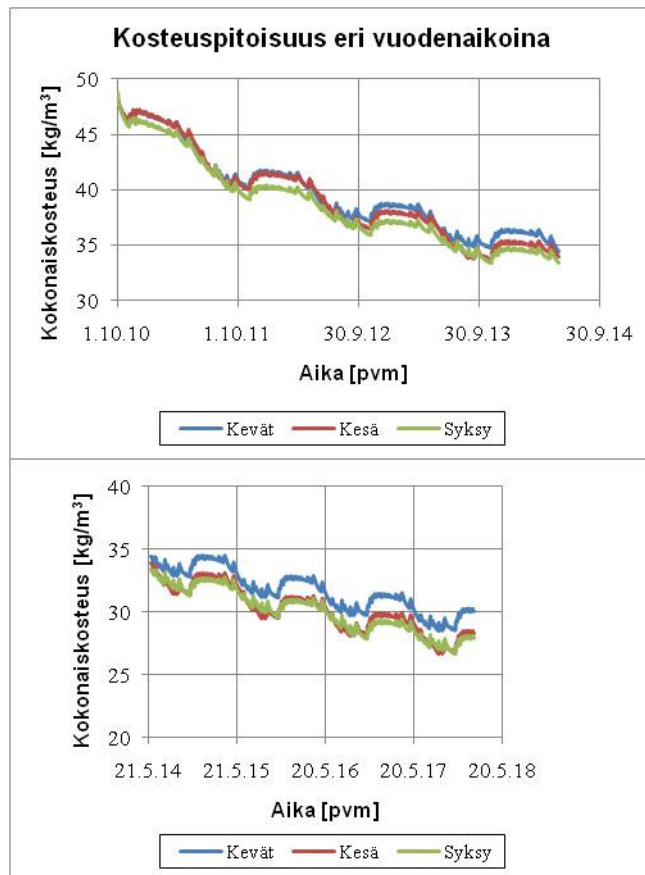
Kuva 6.24 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tiilimuurin keskellä rakennetyypissä US2_3.

Virhettä rakennetyypiin US2_3 aiheutuu materiaaliominaisuuksista sekä ilmavirtauksien laskennasta, kuten tapauksessa US2_1. Tulosten luotettavuus tarkistettiin kuitenkin yksinkertaisilla käsilaskelmilla, joiden tulokset olivat samansuuntaisia WUFI laskelmien kanssa.

6.1.5. Rakennetyyppi US2_4

Lopuksi korjattu rakenne mallinnettiin vielä siten, että kuivuminen on mahdollisimman suurta, lämmityksen ollessa mahdollisimman pieni. Rakennetyyppi US2_4 kuvaa tätä optimoitua tapausta.

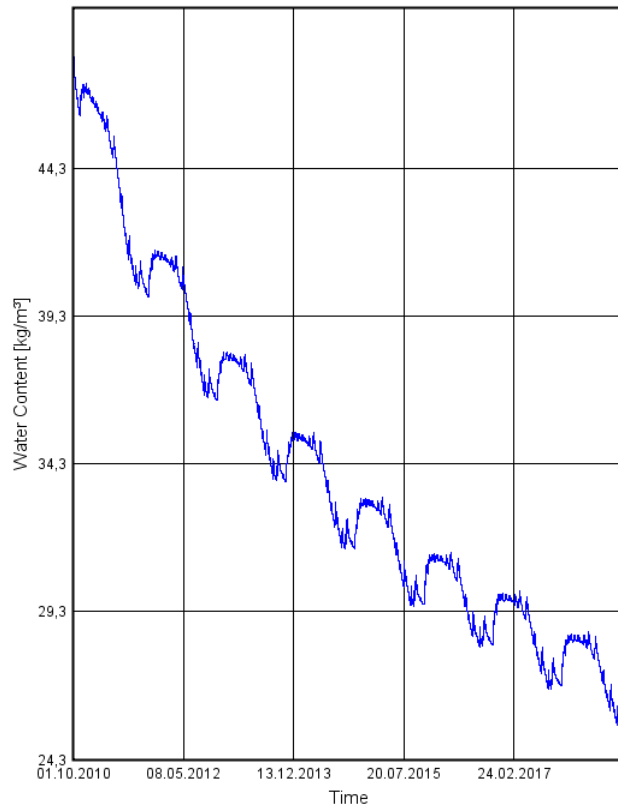
Kuvassa (Kuva 6.25) on esitettynä rakenteen kokonaiskosteuden muuttuminen, kun rakenteen maksimilämmitystä vaihdellaan eri vuodenaikojen mukaan. Lämmityksen säädössä pitkällä aikavälillä parhaat tulokset saatiin ratkaisulla, jossa rakennetta lämmitetään 3/3 teholla kesällä (1.6.–31.8.) ja 1/3 teholla keväällä (1.4.–31.5.) sekä syksyllä (1.9.–30.11.). Talvella (1.12.–31.3.) lämmitys oli pois päältä. Vuoden alin kosteuspitoisuus oli tällöin pienin. Lähes yhtä hyvät tulokset saatiin kuitenkin syksyn maksimilämmityksellä. Ero näiden tapauksien välille syntyi vasta pitkän aikavälin (> 8 v.) tarkaste- luissa.



Kuva 6.25 Kosteuspitoisuuden vuodenaikavertailu

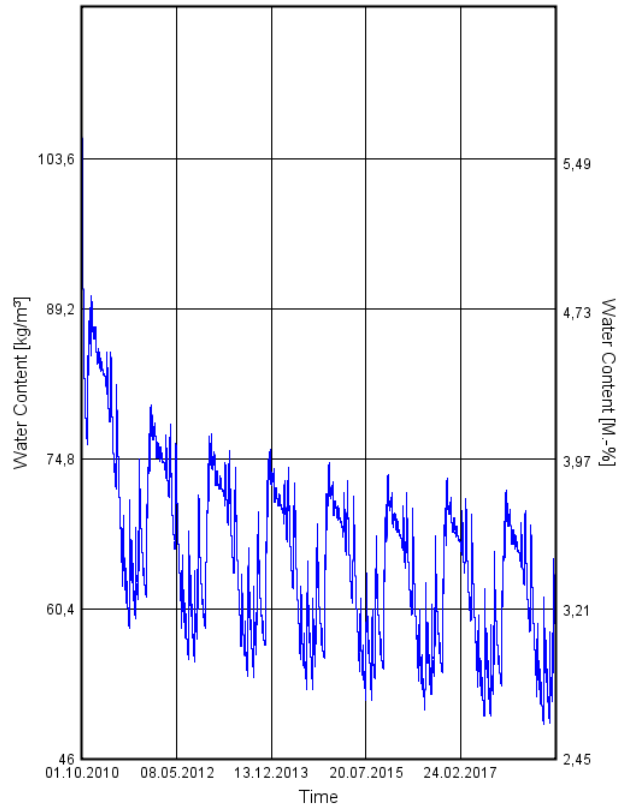
Rakennetyypin US2_4 lämpötilajakauma muistuttaa tapauksia US2_1 ja US2_3. Myös ilmavirtaukset tuuletuskanavistossa ovat yhtenevät näiden tapauksien kanssa. Ilman virtausnopeudet tuuletuskanavistossa olivat keväällä sekä syksyllä 0,006 m/s ja kesällä 0,011 m/s. Talvella lämmityksen ollessa pois päältä virtausnopeutena käytettiin arvoa 0,002 m/s.

Rakennetyypissä US2_4 kokonaiskosteuspitoisuuskäyrä (Kuva 6.26) on laskeva kuten rakennetyypissä US2_3, mutta kokonaiskosteuspitoisuus jää kuitenkin hieman korkeammalle tasolle. Laskentajakson lopussa kosteuspitoisuus on laskenut lukemiin 26–28 kg/m³, josta kosteuspitoisuus laskee vielä jonkin verran. Taustalaastin kosteuspitoisuus on laskennan lopussa 50–70 kg/m³ (Kuva 6.27). Tiilimuurin keskimääräinen kosteuspitoisuus on tällöin 33–35 kg/m³ ja rakenteen ulko-osalla 45–50 kg/m³ (Kuva 6.28 ja Kuva 6.29).



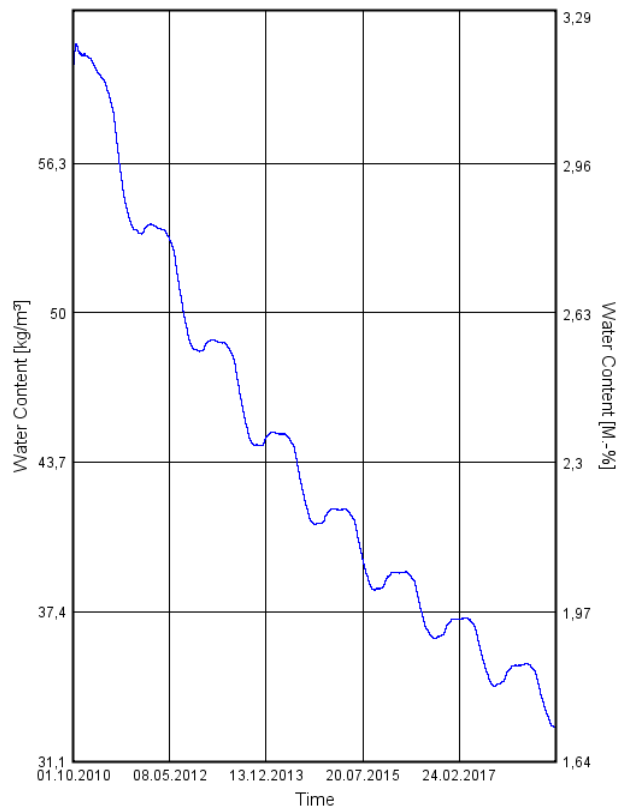
Kuva 6.26 Rakennetyypin US2_4 kokonaiskosteuspitoisuus.

Kosteuspitoisuus kalkkisementtilaasti



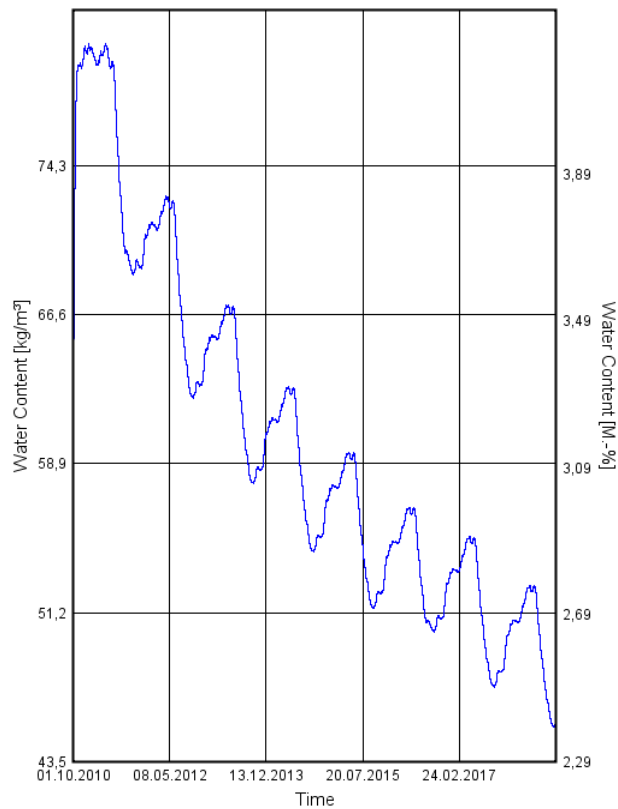
Kuva 6.27 Sauma- ja taustalaastikerroksen keskimääräinen kosteus pitoisuus rakennetyypissä US2_4.

Kosteuspitoisuus tiilimuuri



Kuva 6.28 Tiilimuurin keskimääräinen kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_4.

Kosteuspitoisuus tiilimuurin ulko-osa

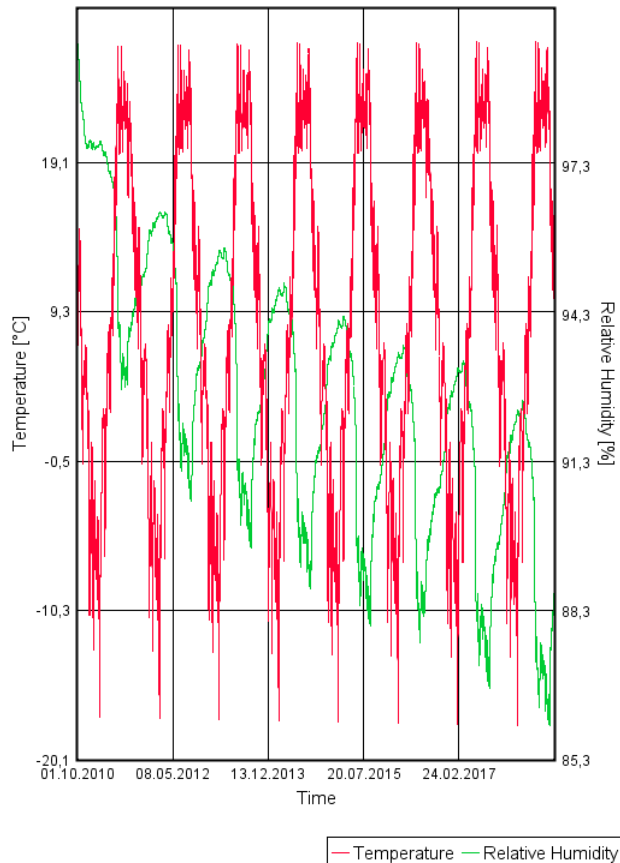


Kuva 6.29 Tiilimuurin ulko-osan kosteuspitoisuus rakennetyypissä US2_4.

Rakennetyypin US2_4 lämpötilat ovat esitettynä kuvissa (Kuva 6.30 ja Kuva 6.31). Tulokset vastaavat aikaisemmin laskettuja tapauksia. Kesälämpötilat ovat yhtenevät rakennetyypin US2_3 kanssa ja keväällä sekä syksyllä lämpötilat noudattavat rakennetyypin US2_1 lämpötiloja.

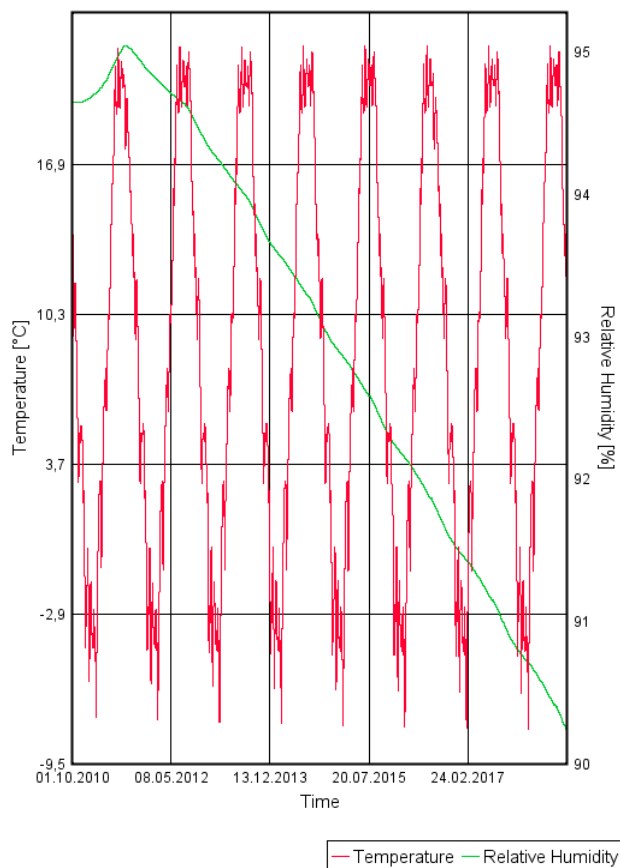
Rakennetyypin US2_4 suhteelliset kosteudet eivät mainittavasti poikkea tapauksesta US2_3. Taustalaastikerroksen sekä tiilimuurin suhteellinen kosteus jää muutaman prosenttiyksikön korkeammalle.

T ja RH kalkkisementtilaasti



Kuva 6.30 Lämpötila ja suhteellinen kosteus taustalaastikerroksen keskellä rakennetyypissä US2_4.

T ja RH tiilimuuri



Kuva 6.31 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tiilimuurin keskellä rakennetyypissä US2_4.

Tuloksien oikeellisuus varmistettiin vielä yksinkertaisten käsilaskelmien avulla. Näiden laskelmien perusteella suunta oli sama, eli kesällä tuuletuskanaviston kautta poistui eniten kosteutta. Mahdollista virhettä tuloksiin aiheuttavat materiaaliominaisuudet sekä ilmavirtaukset, kuten rakennetyypeissä US2_0...3. Koska nämä mahdolliset virheet ovat samat kaikissa tapauksissa, ei tämä kuitenkaan ole lopputuloksen kannalta merkittävää. Rakennemallin tarkoituksena on kuitenkin tutkia lämmityksen säädön vaikutusta kuivumiseen, eikä määritellä rakenteen absoluuttista kosteuspitoisuutta.

6.2. Mittaustulokset

Työssä tutkittiin myös Helsingin rautatieaseman kellotorniin asennetusta mittauslaitteistosta saatuja mittaustuloksia kuuden kuukauden ajalta. Tarkoituksena oli verrata laskelmia mittausdataan tulosten oikeansuuntaisuuden varmistamiseksi.

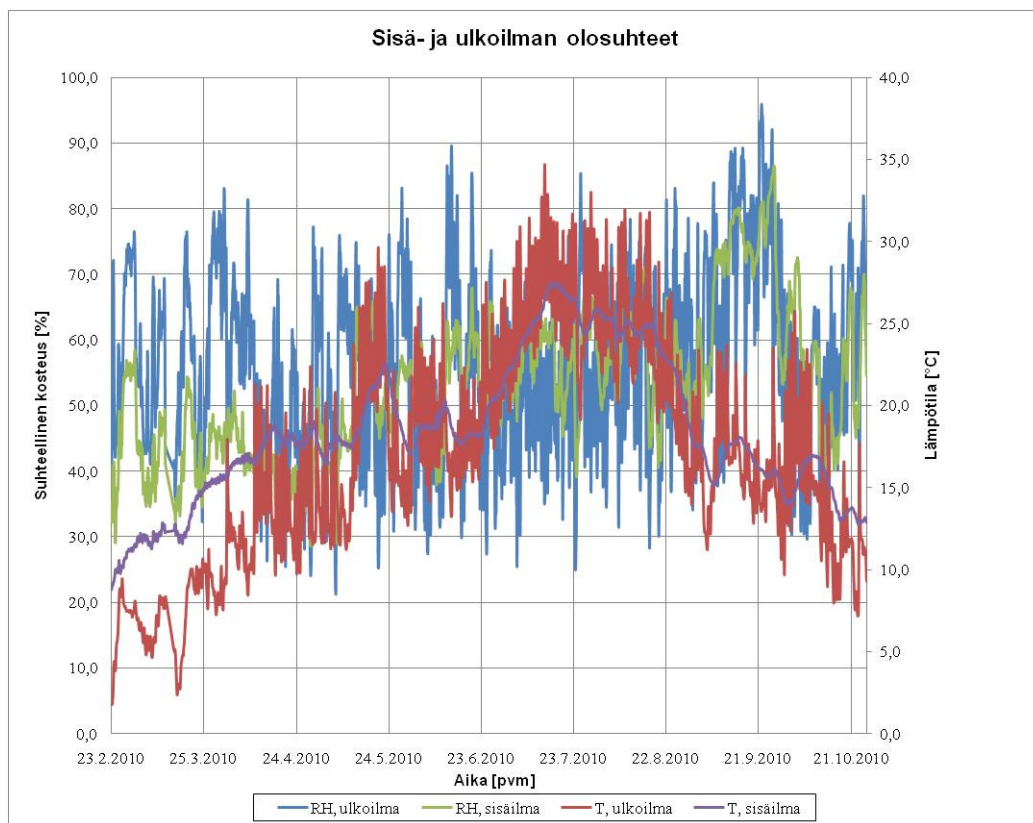
Mittaustuloksista esitetään tässä yhteydessä mittauspisteiden 4 ja 5 tulokset, koska niiden sijainti vastasi parhaiten laskelmia. Mittauspiste 4 sijaitsee eteläjulkisivulla kellotornin keskiosalla ja mittauspiste 5 länsijulkisivulla kellotornin keskiosalla. Lisäksi mittauspiste 5 valintaan vaikutti se, että siinä sisäilman olosuhteita mittaava FC100-anturi oli siirretty tuuletuskanavistoon. Vertailun helpottamiseksi mittaustuloksista poi-

mittiin vain tarvittavien anturien datatiedot. Tarkemmat tiedot mittauslaitteiston rakenteesta ja toiminnasta on esitelty luvussa 3.

Mittausten ajanjaksona oli 23.2.–25.10.2010. Jakson aikana lämpökaapelit olivat kytkettyinä 1/3 teholla ajanjaksolla 16.3.–12.5.2010 ja 29.9.2010–. Näiden ajanjaksojen ulkopuolella lämmitys oli pois päältä. Maksimilämmitystä rakenteessa ei käytetty lainkaan.

6.2.1. Mittauspiste 4

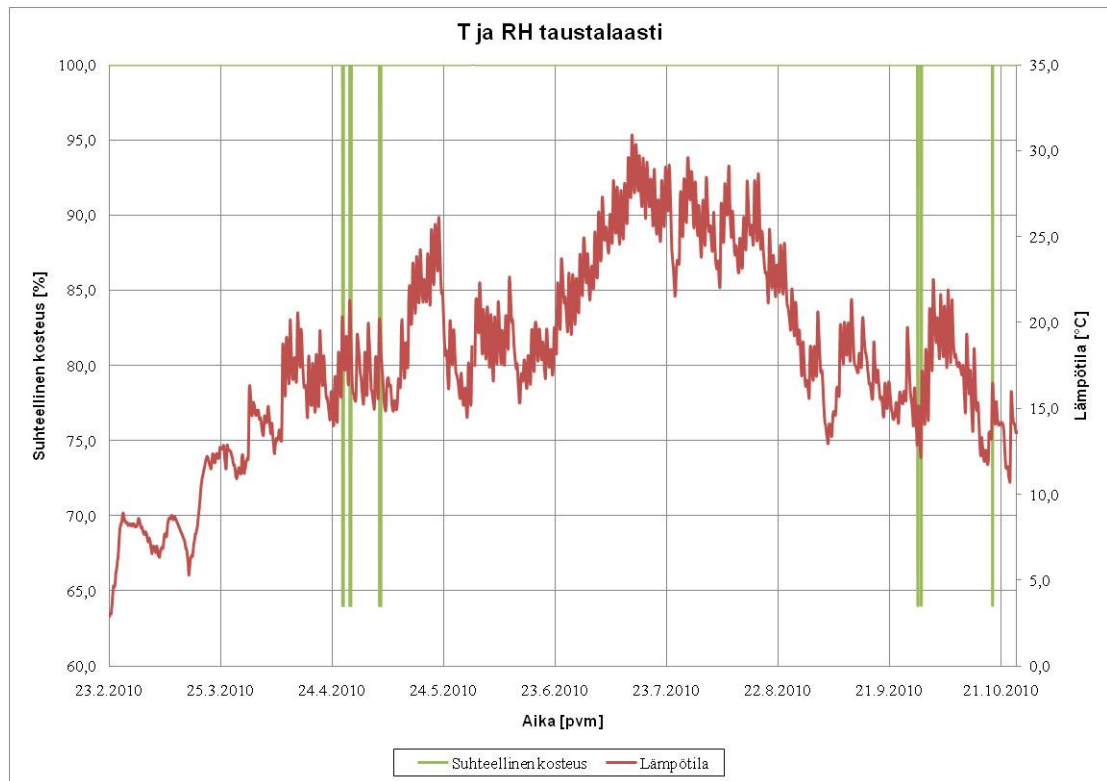
Kuvassa (Kuva 6.32) on esitetty mittauspisteen 4 sisä- ja ulkoilman olosuhteet mittausajanjaksolla 23.2.–25.10.2010. Mittausjakson aikana ulkoilman lämpötilat vaihtelevat välillä 2–34 °C. Sisäilman lämpötilat mukailevat ulkoilman lämpötiloja, mutta vaihteluväli on kuitenkin pienempi (9–27 °C). Suhteellinen kosteus mittausajaksolla vaihtelee ulkoilmassa välillä 23–95 % RH ja sisäilmassa välillä 30–85 % RH. Molemmissa tapauksissa suhteellinen kosteus on keväällä alimmillaan ja syksyllä korkeimmillaan.



Kuva 6.32 Sisä- ja ulkoilman olosuhteet mittauspisteessä 4

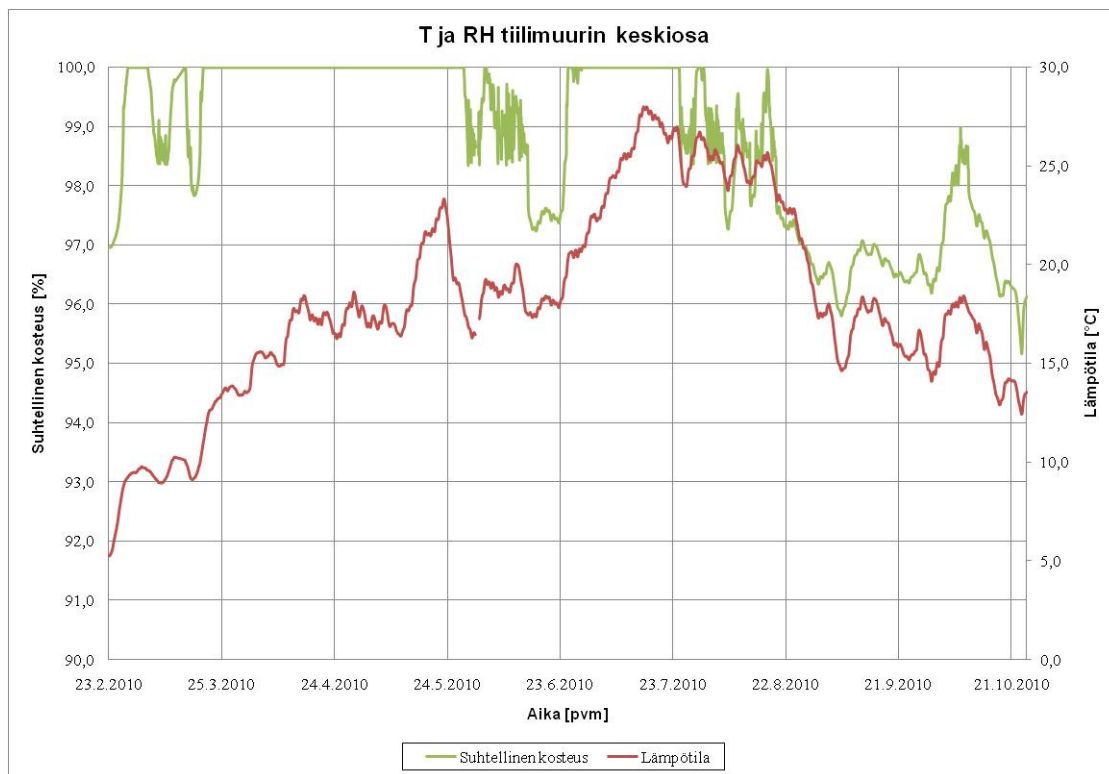
Taustalaastikerroksessa sijaitsevan anturin mittausdataa on esitetty kuvassa (Kuva 6.33). Mittausjakson aikana taustalaastikerroksen lämpötilat ovat hyvin lähellä ulkoilman olosuhteita. Keskilämpötila taustalaastikerroksessa on kuitenkin hieman ulkoilman lämpötilaa korkeammalla. Lämmityskaudella taustalaastin keskilämpötilat kohoavat noin 3 °C ulkoilman lämpötiloja korkeammalle, muulloin taustalaastin lämpötilat ovat

samassa ulkoilman lämpötilojen kanssa. Suhteellinen kosteus taustalaastikerroksessa on koko ajan vakio 100 % RH.



Kuva 6.33 Lämpötila ja suhteellinen kosteus taustalaastikerroksen keskellä

Mittauspisteestä 4 poimittiin lisäksi tiilimuurin keskiosalla sijaitsevan anturin mittauksiedot (Kuva 6.34). Kuvasta nähdään että kesällä sekä lämmitysjaksolla tiilimuurin lämpötilat jäävät selvästi taustalaastikerroksen lämpötiloja matalammalle. Toisaalta keväällä sekä syksyllä lämpötilat ovat hieman korkeammalla. Suhteellinen kosteus tiilimuurin keskiosalla nousee 100 % RH mittausjakson alussa, pysyy siinä koko kesäkauden ajan ja lähtee selvään laskuun syksyllä. Alimmillaan suhteellinen kosteus tiilimuurissa on syksyllä lukemassa 96 % RH.



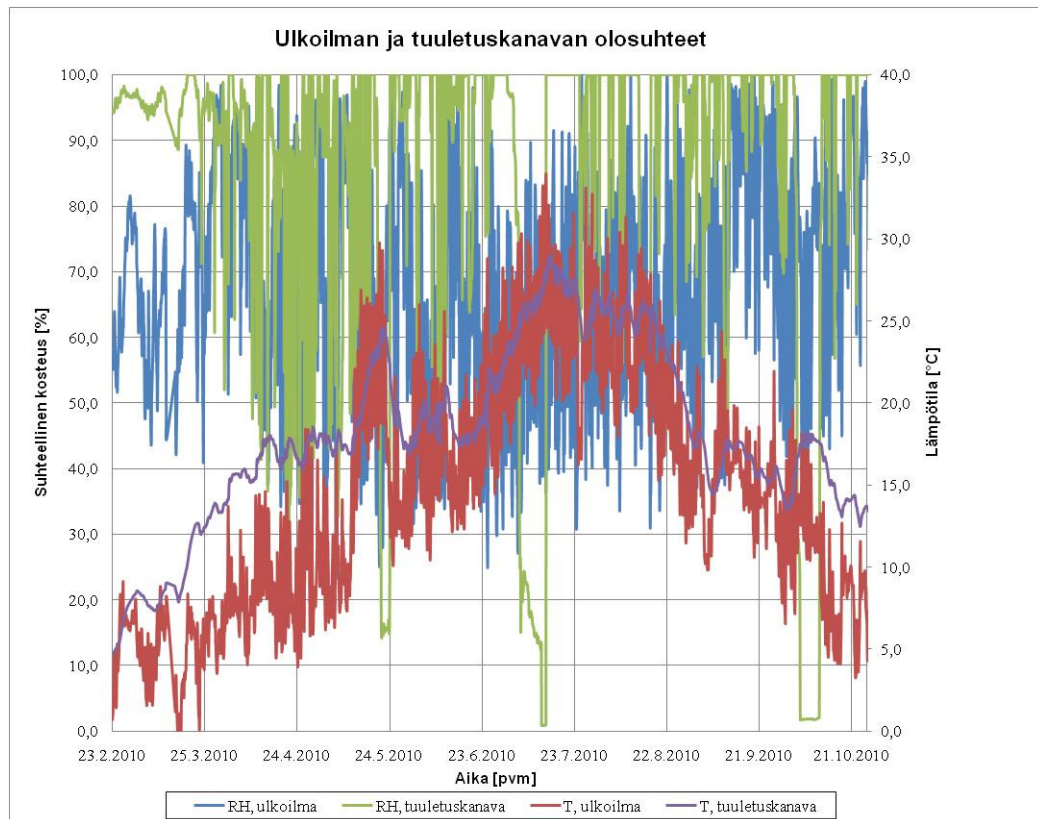
Kuva 6.34 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tiilimuurin keskellä

Mittauksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon kellotornin ympärillä talven ajan ollut sääsuojaus sekä lämmitys. Vaikka sääsuojaus on purettu maaliskuun lopussa korjauksen valmistuttua, aiheuttaa se kuitenkin hieman poikkeavuutta tuloksiin. Etenkin kevään lämpötiloissa tämä tulee ottaa huomioon. Lisäksi poikkeavuutta aiheuttavat kuluun vuoden sääolosuhteet (poikkeuksellisen lämmin kesä).

6.2.2. Mittauspiste 5

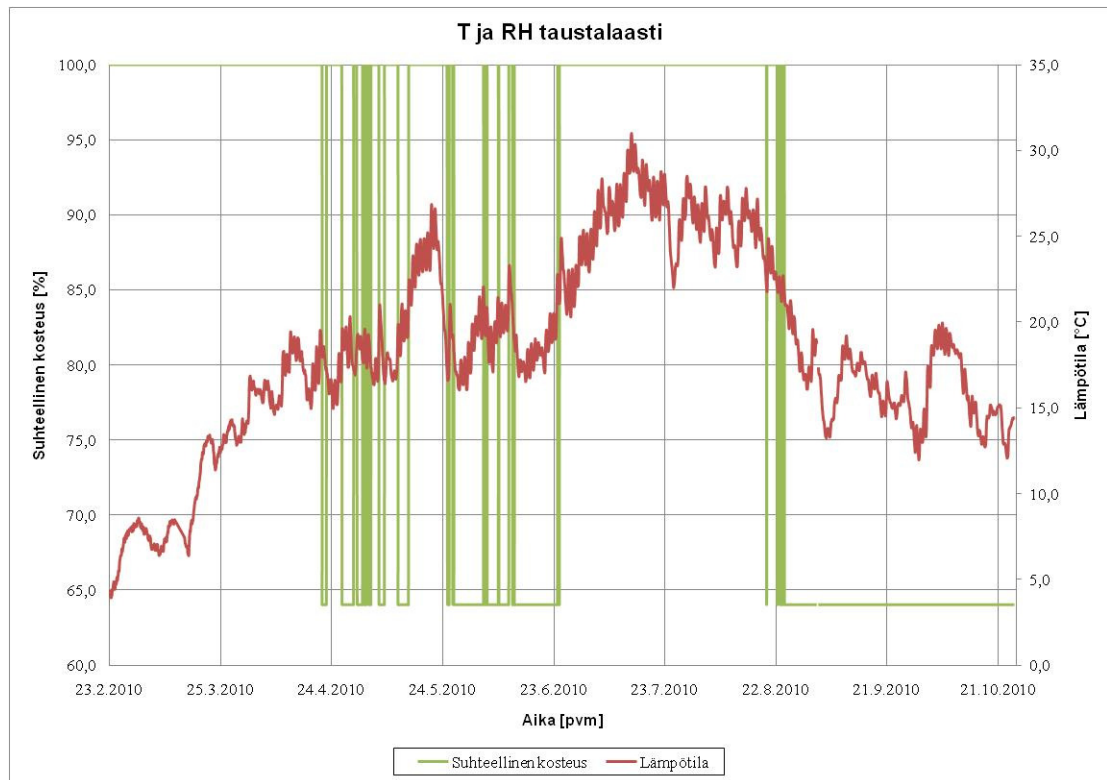
Mittauspisteen 5 ulkoilman sekä tuuletuskanaviston olosuhteet on esitetty kuvassa (Kuva 6.35). Ulkoilman lämpötilat vaihtelevat mittausjaksolla välillä 0–34 °C. Tämä on hieman enemmän kuin mittauspisteessä 4. Suhteellinen kosteus ulkoilmassa vaihtelee välillä 25–99 % RH, ollen keskimäärin kuitenkin mittauspisteen 4 lukemia hieman korkeammalla. Ulkoilman suhteellinen kosteus on keväällä ja alkukesällä alimmillaan.

Tuuletuskanaviston lämpötilat seuraavat ulkoilman lämpötiloja, mutta lämpötilojen vaihteluväli on pienempi. Poikkeuksen tuuletuskanaviston lämpötilakäyrässä tekee kevään ja syksyn lämmitysjakso (16.3–12.5 ja 29.9.10–), jolloin lämpötilat ovat noin 5 °C ulkoilman lämpötiloja korkeammalla. Suhteellinen kosteus tuuletuskanavistossa on selvästi ulkoilman arvoja korkeammalla, mutta lukemat vaihtelevat melko voimakkaasti. Käyrän muodossa näkyy kuitenkin lämmitysjaksojen vaikutus. Lämmitysjaksojen aikana tuuletuskanaviston suhteellinen kosteus on keskimäärin hieman matalampi.



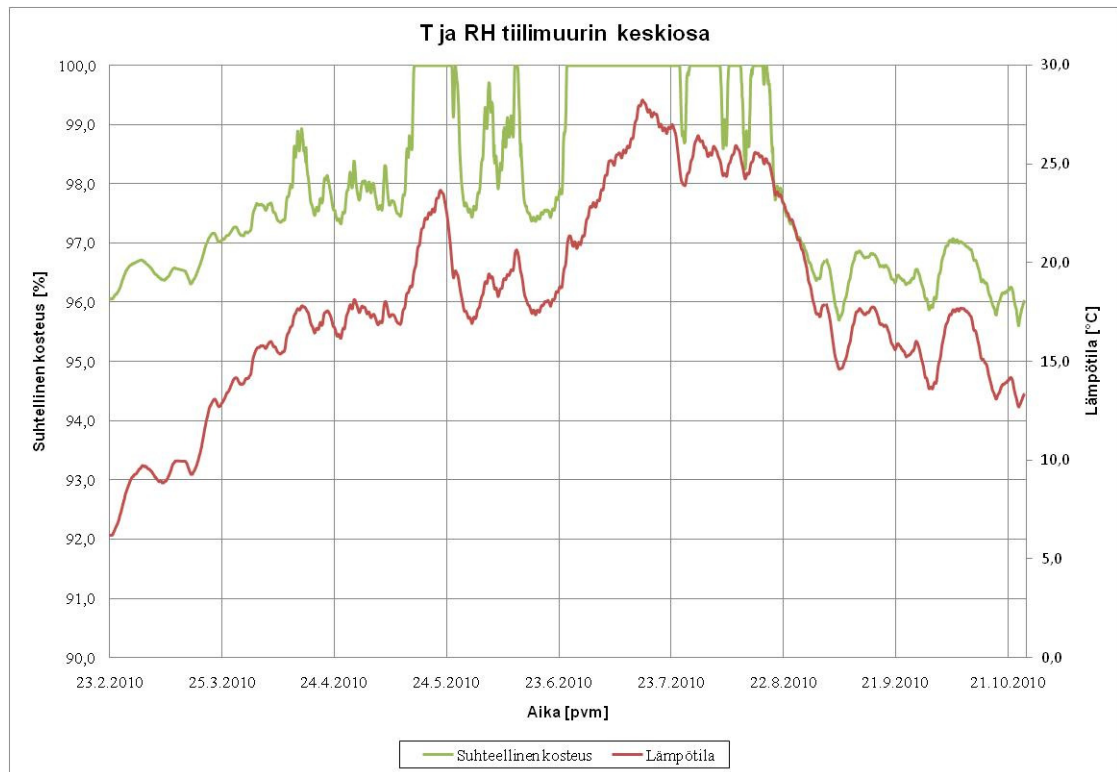
Kuva 6.35 Ulkoilman ja tuuletuskanavan olosuhteet mittauspisteessä 5

Mittauspiste 5 taustalaastissa sijaitsevasta anturista saadut mittaustulokset on esitetty kuvassa (Kuva 6.36). Tuloksista huomataan taustalaastin lämpötilojen olevan samansuuntaisia ulkoilman lämpötilojen kanssa, mutta keskiarvolämpötilat lämmityskaudella ovat selvästi ulkoilman lämpötiloja korkeammalla. Suhteellista kosteutta mittaava anturi näyttää koko mittausjakson ajan 100 % RH, lukuun ottamatta muutamia virhepiikkejä.



Kuva 6.36 Lämpötila ja suhteellinen kosteus taustalaastikerroksen keskellä

Tiilimuurin keskiosalla lämpötilat jäivät hieman matalammiksi kuin taustalaastissa (Kuva 6.37). Muuten käyrän muoto on ulkoilman lämpötiloja mukaileva. Tiilimuurin suhteellinen kosteus vaihtelee mittausjakson aikana 96–100 % RH välillä. Mittausjakson aikana suhteellinen kosteus on korkeimmillaan kesällä ja alimmillaan syksyllä.



Kuva 6.37 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tiilimuurin keskellä

Poikkeavuutta tuloksiin aiheutuu samoista tekijöistä kuin mittauspisteessä 4. Tuloksia tarkasteltaessa tulee myös suhtautua kriittisesti niiden anturien lukemiin, joissa on paljon häirikköpiikkejä (lukemat 64 % RH). Tällainen anturi on esimerkiksi mittauspisteen 5 taustalaastin RH-anturi.

6.3. Tulosten tarkastelu

Tulosten tarkasteluosiossa verrataan luvussa 6.1 esitettyjä tuloksia keskenään sopivan lämmityksen säädön löytämiseksi. Koska aikaisempia vastaavia tutkimuksia ei ole, verrataan tuloksia myös rakennenäytteisiin (2.6.3) ja mittaustuloksiin (6.2).

6.3.1. Rakennetyyppi US1

Tuloksien perusteella rakennetyyppi US1 kerää kosteutta, mutta kosteuspitoisuus vaihtelee rakenteen eri osien välillä. Esimerkiksi tiilimuurin ulko-osan kohdalla kosteuspitoisuus on muuta tiilimuuria korkeammalla tasolla. Tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida, että kosteuspitoisuuskuvaajat ilmoittavat eri materiaalikerrosten keskimääräiset kosteuspitoisuudet.

Verrattuna rakennenäytteistä mitattuihin kosteuspitoisuuksiin, lasketut kosteuspitoisuudet jäivät kuitenkin jonkin verran pienemmiksi. Tämä johtuu siitä, että mallinnettava tilanne on ideaalitilanne, joka vallitsee rakenteessa juuri korjaamisen jälkeen. Rakenteessa ei silloin ole halkeamia ja rapautumia, jotka tuovat vuotovesiä rakenteeseen kuten vanhassa rakenteessa. Lisäksi poikkeavuutta aiheuttaa todellisen rakenteen materiaaliominaisuuksien vaihtelevuus rakennemallin materiaaliominaisuuksiin verrattuna. Täs-

tä seuraa, että mitatut kosteuspitoisuudet ovat paikallisesti huomattavan korkeita sellaisilla tiilimuurin osilla, joiden huokoisuus ja kapillaariset ominaisuudet ovat poikkeavat (esimerkiksi vaaleapolttoiset tiilet).

Todellisuudessa vanhan rakenteen kosteuspitoisuus ei siis tasaannu, vaan rakenteen vaurioituessa, kosteuspitoisuus jatkaa vuosittaista kasvamista. Tutkittavassa tapauksessa US1 ideana on kuitenkin estää rakenteen vaurioituminen lämmityksen säädöllä, joten tästä syystä on perusteltua käyttää rakennemallia, jossa kosteuspitoisuus ei kohoa yhtä korkealle kuin rakennenäytteissä.

6.3.2. Rakennetyyppi US2_0

Rakennetyypin US2_0 kosteuspitoisuus jää huomattavasti pienemmäksi kuin rakennetyypissä US1. Kosteuspitoisuus alkaa jo tässä mallissa laskea, mutta rakenne kerää kuitenkin jonkin verran kosteutta.

Tuloksista huomataan tuuletuskanaviston vähentävän selkeästi kosteuspitoisuutta tiilimuurissa. Tämä johtuu siitä, että kosteuden kapillaarinen siirtyminen tiilimuriin hidastuu, kun yhteistä pinta-alaa laasti- ja tiilikerrosten välillä on vähemmän. Taustalaastikerroksen sekä tiilimuurin ulko-osan kosteuspitoisuudet ovat kuitenkin yhä suuria. Myös kosteusero tiilimuurin sisä- ja ulko-osan välillä on suuri.

Tuuletuskanaviston kautta poistuvan kosteuden määrää vähentää kuitenkin se, että ilmavirtausten nopeudet lämmittämättömän tapauksen tuuletuskanavistossa ovat hyvin pienet. Tuuletuskanaviston toiminnan edellytyksenä on sisään virtaavan ulkoilman lämpeneminen kanavistossa. Koska kellotornin sisäilma on kylmää tilaa, jää rakenteen lämpötilat hyvin lähelle ulkoilman lämpötiloja. Tällöin ulkoilma ei pääse lämpenemään tuuletuskanavistossa ja ilman virtausnopeudet jäävät pieniksi.

Näiden laskentatuloksista tehtyjen havaintojen perusteella voidaan todeta, että pelkkä tuuletuskanavisto ei riitä kuivattamaan rakennetta riittävästi. Rakenteeseen siis tarvitaan lisälämmitystä, kun kyseessä on sisätiloiltaan lämmittämätön rakenne, jossa viistosaderasitus on huomattavan suuri.

6.3.3. Rakennetyyppi US2_1

Rakennetyypin US2_1 kokonaiskosteuspitoisuus laskee selvästi enemmän verrattuna tapaukseen US2_0. Myös tiilimuurin ulko-osan kosteuspitoisuus alkaa laskea tässä tapauksessa.

Laskentatulosten mukaan 1/3 lämmitys parantaa huomattavasti rakenteen kuivumisedellytyksiä ja ero lämmittämättömään rakenteeseen (US2_0) on selvä. Tätä havaintoa tukevat myös ilmavirtaukset, jotka ovat suuremmat 1/3 lämmitetyn rakenteen kuin lämmittämättömän rakenteen tuuletuskanavistossa. Tällöin tuuletuskanaviston kautta poistuu myös enemmän kosteutta.

Laskennan mukaan lisälämmitys parantaa rakenteen kuivumisedellytyksiä jo 1/3 teholla. Koska lähtötilanteen kosteuspitoisuutta (rakennetyyppi US1) on mahdotonta määrittää tarkasti, on kuitenkin vaikea päätellä onko tämä lämmitysteho vielä riittävä.

Todellisuudessa rakennetyypin US2_1 kosteuspitoisuus saattaa kohota laskelmia korkeammaksi.

6.3.4. Rakennetyyppi US2_3

Rakennetyypin US2_3 laskentatuloksissa kokonaiskosteuspitoisuus laskee huomattavan pieneksi. Ero tapaukseen US2_1 verrattuna on selvä. Myös käsilaskennan perusteella tulokset olivat samansuuntaiset.

Tuloksien perusteella rakenteella on reilusti kuivumispotentiaalia, kun lämmitys säädetään maksimiteholle. Tiilen sekä laastikerroksen kosteuspitoisuudet laskevat erittäin matalalle tasolle ja ilman virtausnopeudet tuuletuskanavistossa kohoavat huomattavasti aikaisempiin tapauksiin verrattuna.

Tuloksien perusteella rakenteella on huomattavasti enemmän kuivumispotentiaalia kuin on tarvetta. Tästä syystä maksimilämmityksen käyttö vuoden ympäri ei ole tarpeellista rakenteen kuivumisen kannalta. Lisäksi lämmityskaapeleiden korkea lämpötila lyhentää niiden käyttöikää, mistä johtuen maksimilämmitystä tulisi käyttää vain silloin kun sitä todella tarvitaan.

6.3.5. Rakennetyyppi US2_4

Tuloksien perusteella 3/3 lämmityksen lisääminen kesäkuukausille parantaa rakenteen kuivumisedellytyksiä. Kesälämmityksellä saadut tulokset ovat lähes yhtä hyviä kuin tapauksessa US2_3. Toisaalta myös eroa 1/3 lämmitykseen (US2_1) tuli jonkin verran.

Kesälämmityksen paremmuus muihin vuodenaikoihin verrattuna perustuu kahteen seikkaan. Koska kesällä ja syksyllä sademäärät ovat suurempia kuin keväällä, on perusteltua kuivattaa rakennetta silloin kuin rasiustaso on korkeimmillaan. Toisaalta, koska ilman kyllästyskosteuspitoisuus kasvaa lämpötilan mukana, aiheuttaa esimerkiksi kolmen asteen lämpötilan nousu tuuletuskanavistossa suuremman kyllästysvajauksen kesällä kuin kylminä vuodenaikoina. Tämän perusteella lämmitys kesällä kuivattaa tehokkaammin rakennetta kuin lämmitys syksyllä ja keväällä.

Kylminä vuodenaikoina (talvi) lämmitettäessä on myös riski, että kosteutta siirtyy väärin paikkoihin rakenteessa. Talvilämmitys lisää ilmavirtauksia tuuletuskanavistossa, mutta ulkoilman ollessa tuuletuskanavistosta poistuvaa ilmaa huomattavasti kylmempi on vaarana, että kosteutta tiivistyy tuuletusputkien kohdille. Tällöin talvilämmitys voi pahimmillaan vain lisätä rakenteen kostumista tietyissä kohdissa rakennetta.

Näiden päätelmien perusteella voidaan todeta kesän olevan rakenteen kuivumisen kannalta paras vaihtoehto, jos rakennetta lämmitetään maksimiteholla. Tulosten perusteella voidaan myös todeta rakennetyypillä US2_4 olevan riittävästi kuivumispotentiaalia uusien vaurioiden syntymisen estämiseksi.

6.3.6. Mittaustulokset

Mittaustuloksien korkeiden suhteellisten kosteuksien perusteella havaitaan korjatun rakenteen kosteuspitoisuuksien olevan edelleen suuria. Lämpötilakäyristä erottuu sel-

västi lämmitysjaksot ja talvella kellotornissa ollut sääsuojaus. Näiden havaintojen perusteella voidaankin todeta lämpökaapeleiden ja mittauslaitteiston toimivan hyvin, lukuun ottamatta muutamien mittauspisteiden kontaktihäiriöitä.

Tuloksista huomataan mittauspisteiden 4 ja 5 lämpötilojen poikkeavan toisistaan. Mittauspisteen 5 ulkoilman lämpötilat ovat hieman mittauspistettä 4 alempia. Tämä johtuu siitä, että mittauspiste 4 sijaitsee eniten lämpösäteilyä keräävällä eteläjulkisivulla. Laastin lämpötilakäyrät ovat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan. Tästä syystä tuuletuskanaviston ja ulkoilman välinen lämpötilaero on laskelmia (US2_0...1) suurempi mittauspisteessä 5 ja paremmin laskelmien kanssa pätee mittauspisteen 4 tulokset.

Mittauspisteiden 4 ja 5 suhteelliset kosteudet tiilimuurin osalta mukailevat lämpötilakäyriä. Toisaalta ero lämpötilakäyrän ja suhteellisen kosteuden välillä on keväällä suurempi. Tämän perusteella näyttäisi siltä, että tiilimuri alkaa kuivua keskiosasta. Laastin suhteellinen kosteus on kuitenkin koko ajan lukemassa 100 % RH. Lisäksi mittausjakson alussa ollut sääsuojaus vaikuttaa kevään mittautuloksiin myös suhteellisen kosteuden osalta. Tästä syystä tuloksista ei voida päätellä rakenteen vielä kuivuvan, vaan seuranta on ehdottomasti jatkettava.

Mittautulokset poikkeavat melko paljon laskelmista. Poikkeavuutta mittautulosten ja laskelmien välillä aiheuttavat rakennepaksuuksien vaihtelu, laastin todellisen kosteuspitoisuuden suurempi alkuarvo laskelmiin nähden sekä ulkoilman lämpötilojen poikkeavuus keskiarvolukemiin (WUFI:n säätiedosto) nähden. Lisäksi poikkeavuutta aiheuttaa se, että mittausjakson aikana rakenteen lämmityksen säätö ei ole ollut laskelmien mukainen (lämmitys on ollut kesällä pois päältä). Laskelmiin verrattuna lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajat ovat kuitenkin samanmuotoisia, mikä tukee laskelmien oikeellisuutta materiaaliominaisuuksien suhteen. Lisäksi lämpötilan nousu tuuletuskanavistossa on laskelmissa sekä mittautuloksissa samaa suuruusluokkaa.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1. Päätelmät

Helsingin rautatieaseman kellotornin alkuperäisen tuulettumattoman ulkoseinärakenteen (US1) kosteuskertymä on nouseva ja korjatun, eri tavoin lämmitetyn ulkoseinärakenteen (US2-variaatiot) kosteuskertymä on laskeva. Tulosten perusteella taustalaastin lämmitys (US2_1...4) parantaa oleellisesti kuivumista ja edesauttaa tuuletuskanaviston toimintaa ilmavirtauksia lisäämällä, verrattuna tuulettumattomaan tapaukseen (US1) sekä lämmittämättömään tapaukseen (US2_0). Tuloksista voidaan myös päätellä, että kuivuminen on tehokkainta kun ulkoseinärakennetta lämmitetään kesäaikana.

Tuloksien perusteella ei kuitenkaan voida päätellä kellotornin absoluuttisia kosteuspitoisuuksia, koska laskennalliset vanhan rakenteen kosteuspitoisuudet poikkeavat jonkin verran mitatuista kosteuspitoisuuksista. Yksi syy on se, että laskelman vanha rakenne kuvastaa ehjää rakennetta, jossa ei ole halkeamia, joiden kautta ylimääräistä kosteutta pääsee rakenteeseen. Lisäksi poikkeavuutta todellisen ja laskennallisen rakenteen välillä aiheuttavat materiaalien kosteustekniset ominaisuudet, joita on mahdotonta määrittää tarkasti. Tuloksia tarkasteltaessa tulee kuitenkin huomioida, että tarkoituksena oli tutkia, miten lisälämmitys sekä lämmityksen tehonsäädön kausittainen vaihtelu vaikuttavat kellotornin kuivumiseen. Näihin kysymyksiin voidaan tehtyjen laskelmien perusteella vastata.

Ulkoseinärakenteen kosteuspitoisuus on riippuvainen julkisivuihin kohdistuvista viistosademääristä sekä rakennepaksuuksista, jotka vaihtelevat kellotornin alueella melkoisesti. Lisäksi tuloksiin vaikuttaa kellotornin julkisivun ilmansuunta. Tästä syystä ei voida kovin tarkasti sanoa, kuinka paljon rakennetta pitäisi lämmittää. Todennäköisesti vain pahiten rasitetut julkisivunosat vaativat tehokkaampaa (3/3) lämmitystä ja muualla selvittäisiin peruslämmityksellä (1/3).

Mittaustuloksien perusteella voidaan sanoa mittaustulosten ja lämmityskaapeleiden toimivan hyvin. Tulokset myös tukevat laskelmista tehtyjä päätelmiä lämmityksen vaikutuksesta tuuletuskanaviston toimintaan. Rakenteen kuivumista ei mittaustulosten perusteella kuitenkaan vielä voida havaita, vaan kosteuspitoisuuden seurantamittausta sekä rakenteen lämmitystä on ehdottomasti jatkettava.

Yleisellä tasolla tuloksista voidaan myös päätellä, että sisätiloiltaan kylmissä, runsaalle viistosateelle alttiina olevissa luonnonkiviverhotuissa ulkoseinärakenteissa riittävä kuivuminen edellyttää lisälämmitystä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi rannikkoseudulla sijaitsevat tornimaiset luonnonkiviverhotut massiivitiilirakenteet. Näissä kohteissa kuivumisedellytykset ilman lisälämmitystä ovat heikot.

7.2. Suositukset

Helsingin rautatieaseman kellotornin seinärakenteessa tiedetään olevan korjauksen jäljiltä runsaasti kosteutta. Korjauksen pitkäikäisyyden kannalta on erittäin tärkeää, että tämä kosteus saataisiin poistettua rakenteesta mahdollisimman nopeasti. Muuten on riskinä, että uusia vaurioita pääsee syntymään rakenteeseen.

Edellä mainituista syistä johtuen suosittelen, että rakennetta lämmitettäisiin aluksi mahdollisimman tehokkaasti. Käytännössä tämä tarkoittaa taulukon (Taulukko 7.1) mukaista lämmityksen säätöaikataulua kaikilla julkisivuilla.

Taulukko 7.1 Suositus sähkölämmityksen ohjausaikatauluksi

Vuodenaika	Pvm	Lämmityksen säätö
Kevät	1.4.–31.5.	1/3 teho
Kesä	1.6.–31.8.	3/3 teho
Syksy	1.9.–30.11.	1/3 teho
Talvi	1.12.–31.3.	0 teho

Taulukon (Taulukko 7.1) mukaista lämmitystä jatketaan niin kauan, kunnes korjauksesta tullut ylimääräinen kosteus on kuivunut ulkoseinärakenteesta. Sopiva aika voisi olla esimerkiksi 5 vuotta. Tämän jälkeen voidaan siirtyä 1/3 lämmitykseen myös kesän osalta, sillä 1/3 lämmitys riittää kyllä kuivattamaan julkisivuun imeytyneen viistosateen, kunhan rakenteessa ei ole enää ylimääräistä rakennusaikaista kosteutta.

Ideana lämmityksen säädössä on, että loppusyksyn sekä alkukevään lämmityksellä hidastetaan vaurioiden syntymistä ja kesällä kuivatetaan rakennetta. Jotta vaurioita ei pääse syntymään, annetaan rakenteen olla jäässä vain silloin, kun lämpötilat eivät vaihtelee nollan molemmin puolin. Koska lämpökaapeleiden käyttöikä on rajallinen, on maksimilämmityksen rajoittaminen kesän ajalle erittäin tärkeää korjauksen pitkäikäisyyden kannalta.

Jos näyttää siltä, että rakenne ei kuivu esitetyllä lämmityksellä, maksimilämmitystä voidaan jatkaa alkusyksylle (syyskuu - lokakuu). Syksyn lämmityksellä saadaan lähes yhtä hyvät tulokset kuin kesällä. Käytännössä tämä lisälämmityksen tarve selviää kosteuspitoisuuksien seurantatutkimuksella.

7.3. Jatkotutkimukset

Helsingin rautatieaseman kellotorni on ensimmäinen luonnonkiviverhottu massiivitiilirakenne, jossa on käytetty laaja-alaisesti ulkoseinärakenteen lämmitystä kuivumisedellytyksien parantamiseksi. Tämä diplomityö on myös ensimmäinen laskennallinen tutkimus korjatun, tuuletuskanavistolla varustetun luonnonkivijulkisivun kosteusteknisestä toiminnasta. Tästä syystä rakenteen kuivumisen edistymistä tulee seurata myös jatkossa.

Jatkotutkimuksessa seurataan kellotorniin asennetun mittauslaitteiston avulla rakenteen kosteuspitoisuuden kehittymistä. Selvitettäviä asioita ovat ainakin 1/3 lämmityk-

seen siirtymisen ajankohta myös kesäisin sekä mahdollisen lisälämmityksen tarve. Olisi myös hyvä, jos mittauksien tueksi tehtäisiin vielä muutamia tarkennuslaskelmia.

Kellotornista voitaisiin myös ottaa rakennenäytteitä kosteuspitoisuuksien varmistamiseksi. Mahdolliset rakennenäytteet otettaisiin noin 5 vuoden kuluttua. Näytteiden ottaminen ajoitettaisiin siten, että saataisiin selville vuoden ylin ja alin kosteuspitoisuus. Näytteidenottopaikka olisi niin lähellä tiilimuurin ulkopintaa kuin käytännössä on mahdollista. Koska WUFI-ohjelmalla saadaan määritettyä kosteuspitoisuudet miltä tahansa laskentasyvytydeltä, voitaisiin näitä mitattuja kosteuspitoisuuksia vertailla myös tehtyjen laskelmien kanssa.

Rakennenäytteiden sekä mittaustulosten avulla voidaan seurata korjatun luonnonkivijulkisivun kuivumisen kehittymistä laskelmiin verrattuna. On erittäin tärkeää seurata rakenteen kosteustilaa, jolloin myös lämmityksen säädön muutokset ovat mahdollisia.

LÄHDELUETTELO

1. **Mäki-Ruuti, Noora.** *Helsingin rautatieaseman kellotornin korjaus. Kandidaatintyö.* Tampere : TTY Rakennustekniikan osasto, 2010.
2. *Keksintöjen kirja. Rakennustaide ja rakennustekniikka.* Porvoo : WSOY, 1938.
3. **Asp, G.E.** *Huonerakenteiden oppi.* Helsinki : TKK Arkkitehtuurin historian laitos, 1992.
4. **Mesimäki, P.** *Luonnonkivirakenteiden suunniteluohje.* s.l. : Kiviteollisuusliitto ry, 1997.
5. **Lahdensivu, J.** *Luonnonkiviverhottujen massiivitiiliseinien vaurioituminen ja korjausperiaatteet.* Tampere : TTY Talonrakennustekniikka Tutkimusraportti 127, 2003.
6. **Pentti, M.** *Ulkoseinärakenteiden pitkäaikaiskestävyys betonirakenteiset, muuratut ja puujulkisivut.* Tampere : TTKK Talonrakennustekniikka Raportti 33, 1988.
7. **Pentti, M., Hyypöläinen, T.** *Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu.* Tampere : TTKK Talonrakennustekniikka Julkaisu 94, 1999.
8. **Kuokkanen, R., Leiponen, K.** *Suomen tiiliteollisuuden historia.* Helsinki : Suomen tiiliteollisuusliitto r.y., 1981.
9. **Duhrkop, Henry et al.** *Laasti, Muuraus, Rappaus.* Helsinki : Rakentajain Kustannus Oy, 1966.
10. **von Konow, Thorborg.** *Laastit vanhoissa rakenteissa.* Helsinki : Suomenlinnan hoitokunta, 2006.
11. **Pentti, M.** Luonnonkiviverhottujen massiivitiiliseinien kestävyys. *Rakennustekniikka.* 3/94, s.37-40.
12. *Betonijulkisivun kuntotutkimus 2002-BY 42.* Helsinki : Suomen Betonitieto Oy, 2002.
13. **Rissanen, Jari.** *Kosteustekninen kuntotutkimus, Diplomityö.* Tampere : TTY Talonrakennustekniikka, 2005.
14. **Leppäniemi, A. Kokko, P.** Helsingin rautatieaseman kellotornin korjaussuunnitelmat, työselitykset sekä muistiot. Helsinki : Julkaisematon, Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy, 2008-2010.
15. **TTY/Rakennustekniikan laitos.** *Savitaipaleen kirkko, kuntotutkimus.* Tampere : TTY Talonrakennustekniikka, tutkimusselostus nro trt/1734/2009, 2009.
16. **Pentti, M.** Kivijulkisivujen vauriot ja korjaus, esimerkkinä Kallion Kirkko. *Rakennustaiteen seura, jäsentiedote.* 1/2000, s.31-35.
17. **Suni, R.** *Kallion kirkon korjaussuunnitelmat.* Helsinki : Julkaisematon, Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy, 1998-2002.

18. **Leppäniemi, A.** *Turun taidemuseon korjaussuunnitelmat*. Helsinki : Julkaisematon, Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy, 2003-2004.
19. —. *Tampereen tuomiokirkon korjaussuunnitelmat*. Helsinki : Julkaisematon, Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy, 2005-2007.
20. **Hausen, M.** *Elriel Saarinen, Suomen aika*. Keuruu : Suomen rakennustaiteen museo, 1990.
21. **Kukko, H. Laukkanen, K.** *Vedeneristysalustan kosteuden mittausmenetelmät ja kriteerit*. Espoo : VTT Tutkimusselostus Nro VTT-S-08802-09, 2009.
22. **Halsas, E.** *Kosteuden mittausmenetelmien vertailua*. Kuopio : Kuopion yliopisto, tutkimuksia ja selvityksiä 9/2007, 2007.
23. **Merikallio, T.** *Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi*. Helsinki : Suomen betonitieto, 2002.
24. **Fuktcom AB.** *Kosteumittauslaitteita myyvän ja valmistavan yrityksen kotisivut*. [Online] 2010. [Viitattu: 17. 06 2010.] <http://www.fuktcom.se>.
25. **Kronlöf, A. Salparanta, L.** *Kahden sillan kansilaattojen RH-seurantamittaukset*. Espoo : VTT Tutkimusselostus Nro VTT-S-02777-07, 2007.
26. **Vinha, J.** *Rakennusfysiikka 1 ja 2, opintomoniste*. Tampere : Julkaisematon, 2007.
27. **Björkholtz, D.** *Lämpö ja Kosteus. Rakennusfysiikka*. Helsinki : Rakentajain Kustannus Oy, 1987.
28. **Ormiskangas, Petteri.** *Betonisandwich-elementtien kosteustekninen toiminta paksuilla eristeillä. Diplomityö*. Tampere : TTY Rakennustekniikan osasto, 2009.
29. **Hagentoft, C.E.** *Introduction to building physics*. Lund : Studentlitteratur, 2001.
30. *Kosteus rakennusteknisenä ongelmana. rakenteiden kosteustekniset suunnitteluperiaatteet. Kosteustekniset suunnitteluratkaisut. K76-1987, RIL. s.l. : Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, 1987.*
31. **SFS-EN 12524 .** *Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values*. Helsinki : Suomen standardisoimisliitto SFS.
32. **Pentti, M.** *Eristysrakenteet, opintomoniste osa I*. Tampere : Julkaisematon, 2005.
33. **Tilastoja Suomen Ilmastosta 1961-1990. Liite suomen meteorologiseen vuosikirjaan, nide 90, osa 1-1990.** Helsinki : Ilmatieteen Laitos, 1991.
34. **Tuominen, P.** *Helsingin rautatieaseman kellotornin sähkösuunnitelmat*. Helsinki : Julkaisematon, Insinööritoimisto Olof Granlund Oy, 2009-2010.
35. **WUFI Pro 5.0. Online Help.**

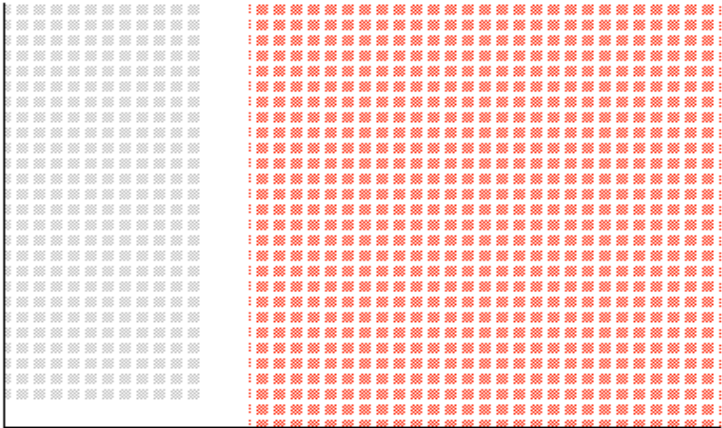
LIITE 1: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET, RAKENNETYYPPI US1

WUFI2D Project Overview

Info:

Projectname: Diplomityö
Contact:
Phone:
City-Zip:
Street:
Client: VR
Number: 9002
Remarks:
e-Mail:
Responsible:
Fax:
Comment:
Date of creation: 2010-08-09 10:09:04

Construction:

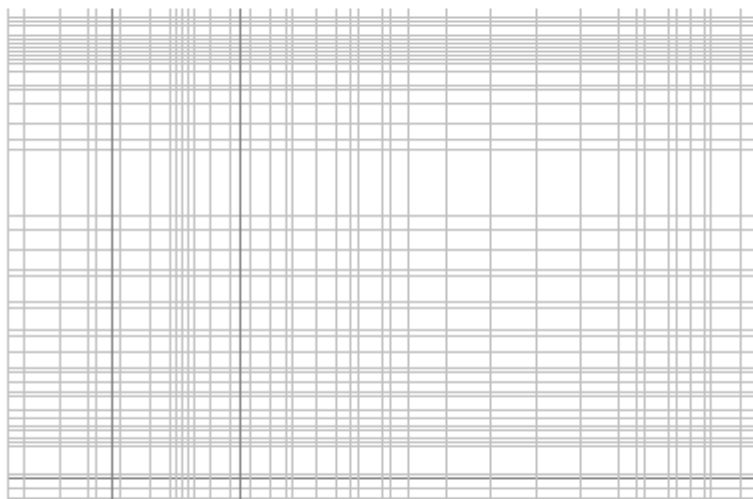


Rectangles / Orthogonal Polygons:

Name	XMaterialFilename	YMaterialFilename	Initial Theta	Initial Phi	Initial WaterContent 4
------	-------------------	-------------------	---------------	-------------	------------------------

Sources:

0

Grid:**X-Direction:**

Number of layers: 6

Mode of generation: 2

Number of elements: '16','16','5','5','31','31'

Dimension [mm]: '125','125','30','30','300','300'

Expansion factor: '1.0328','0.9683','0.9945','1.0056','1.0293','0.9715'

Y-Direction:

Number of layers: 4

Mode of generation: 2

Number of elements: '4','4','48','48'

Dimension [mm]: '16.5','16.5','283.5','283.5'

Expansion factor: '1.0206','0.9799','1.0157','0.9845'

Computational Parameters:

Timestep [s]: 3600

Number of timesteps: 70080

Convergence criterion: 5E-4

Max. number of iterations: 1.5E3

Include Heat of Evaporation: TRUE

Include Heat of Fusion: TRUE

Take capillary conduction into account: TRUE

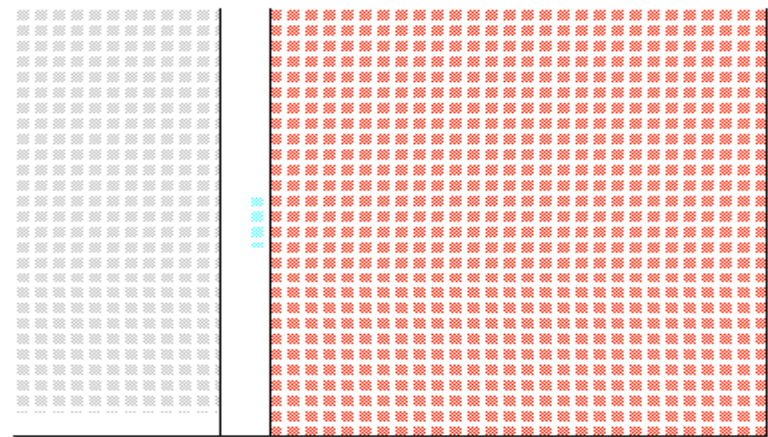
LIITE 2: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET, RAKENNETYYPPI US2_0

WUFI2D Project Overview

Info:

Projectname: Diplomityö
Contact:
Phone:
City-Zip:
Street:
Client: VR
Number: 9002
Remarks:
e-Mail:
Responsible:
Fax:
Comment:
Date of creation: 2010-08-09 10:09:04

Construction:



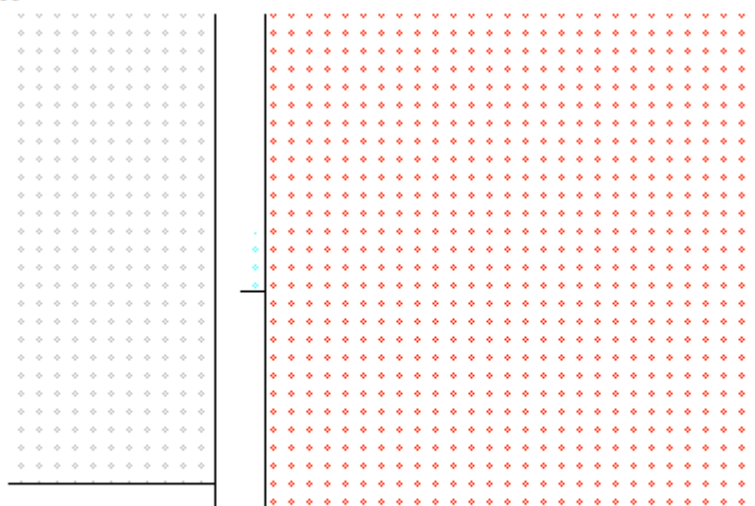
Rectangles / Orthogonal Polygons:

Name	XMaterialFilename	YMaterialFilename	Initial Theta	Initial Phi	Initial WaterContent 7
------	-------------------	-------------------	---------------	-------------	------------------------

r1	Kristallinemetamorphe Gesteine Granit Basalt Marmor.xml	ditto	15	0.8	0.0
r2	Kalkkisementtilaastihieno.xml	ditto	15	0.998146	115
r4	Tiilimuuri.xml	ditto	15	0.946355	60
r5	Ilmakerrosmmwithoutadditionalmoisturecapacity.xml	ditto	15	0.8	0.0

Outersurfaces:

11

**Surface Coefficients:**

Name	Heat Transfer Coefficient	SD-Value	Rain Absorption	Radiation Absorption	Radiation Emissivity 4
rakenne	0	0	0	0	0
ulkopinta	17	---	0,7	0.9	0.9
ulkopinta2	17	---	1	0.4	0.9
sisäpinta	8	0	0	0	0

Climate:

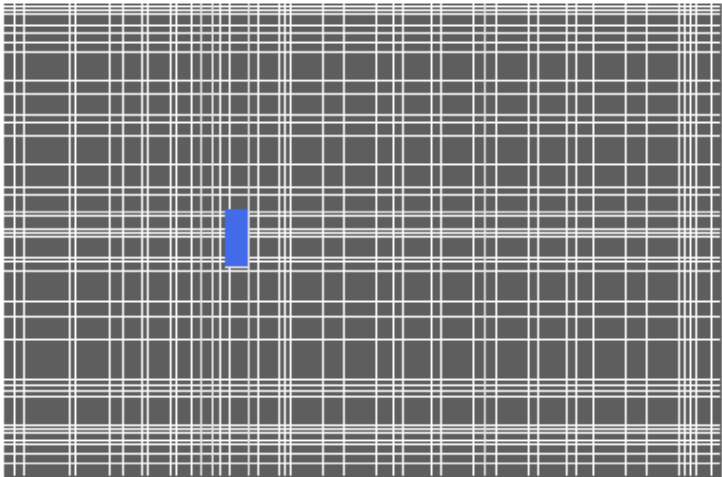
ClimateFile	Orientation	Inclination
0	South	90
203	South	90
203	South	90

0	South	90
---	-------	----

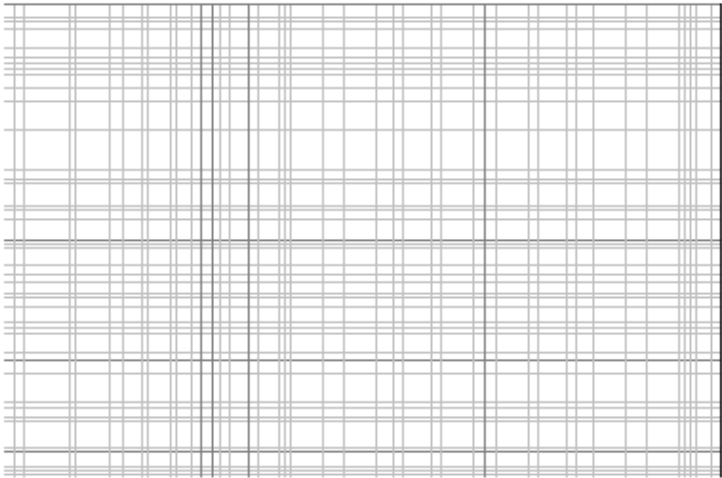
Sources:

1

Name	Type	Fraction	FileName	Associated Boundary
Source 1	Air Exchange Source	4	-	ulkopinta2



Grid:



X-Direction:

Number of layers: 8
 Mode of generation: 2
 Number of elements: '17','17','2','2','2','2','31','31'
 Dimension [mm]: '125','125','15','15','15','15','300','300'
 Expansion factor: '1.0235','0.9770','1.4725','0.6791','1.4725','0.6791','1.0293','0.9715'

Y-Direction:

Number of layers: 8
 Mode of generation: 2
 Number of elements: '4','4','19','19','8','8','21','21'
 Dimension [mm]: '16.5','16.5','116','116','35','35','132.5','132.5'
 Expansion factor: '1.0206','0.9799','1.0448','0.9571','1.0254','0.9752','1.0432','0.9586'

Computational Parameters:

Timestep [s]: 3600
 Number of timesteps: 70080
 Convergence criterion: 5E-4
 Max. number of iterations: 1.5E3
 Include Heat of Evaporation: TRUE
 Include Heat of Fusion: TRUE
 Take capillary conduction into account: TRUE

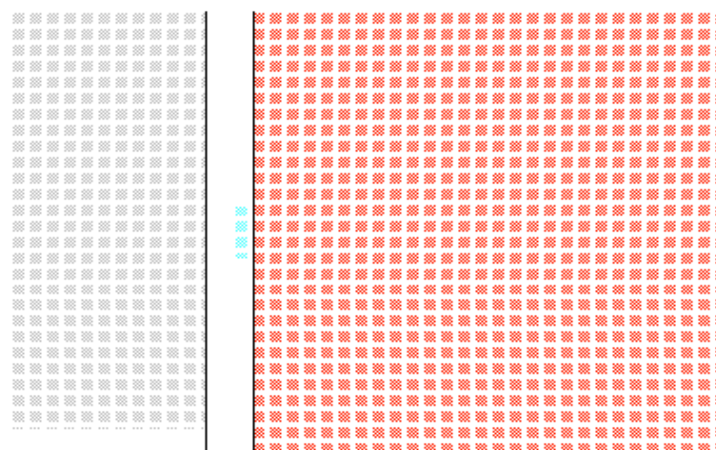
LIITE 3: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET, RAKENNETYYPPI US2_1

WUFI2D Project Overview

Info:

Projectname: Diplomityö Noora
 Contact:
 Phone:
 City-Zip:
 Street:
 Client: VR
 Number: 9002
 Remarks:
 e-Mail:
 Responsible:
 Fax:
 Comment:
 Date of creation: 2010-08-30 12:10:28

Construction:



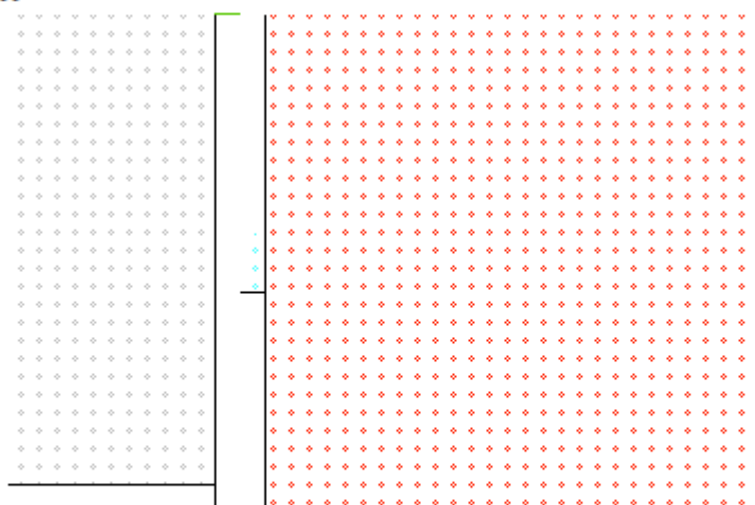
Rectangles / Orthogonal Polygons:

Name	XMaterialFilename	YMaterialFilename	Initial Theta	Initial Phi	Initial WaterContent
					7

r1	Kristallinemetamorphe Gesteine Granit Basalt Marmor.xml	ditto	15	0,9	0.1
r2	Kalkkisementtilaastihieno.xml	ditto	15	0.998146	115
r4	Tiilimuuri.xml	ditto	15	0.946355	60
r6	Ilmakerrosmmwithoutadditionalmoisturecapacity.xml	ditto	20	0.8	0.0

Outersurfaces:

11

**Surface Coefficients:**

Name	Heat Transfer Coefficient	SD-Value	Rain Absorption	Radiation Absorption	Radiation Emissivity 4
rakenne	0	0	0	0	0
ulkopinta	17	----	0,7	0.9	0.9
ulkopinta 2	17	----	1	0.4	0.9
sisäpinta	8	----	0	0	0

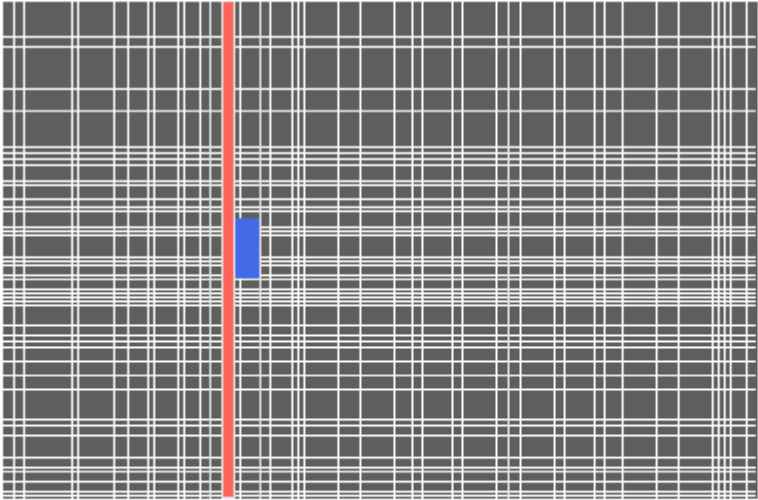
Climate:

ClimateFile	Orientation	Inclination
0	South	90
203	South	90

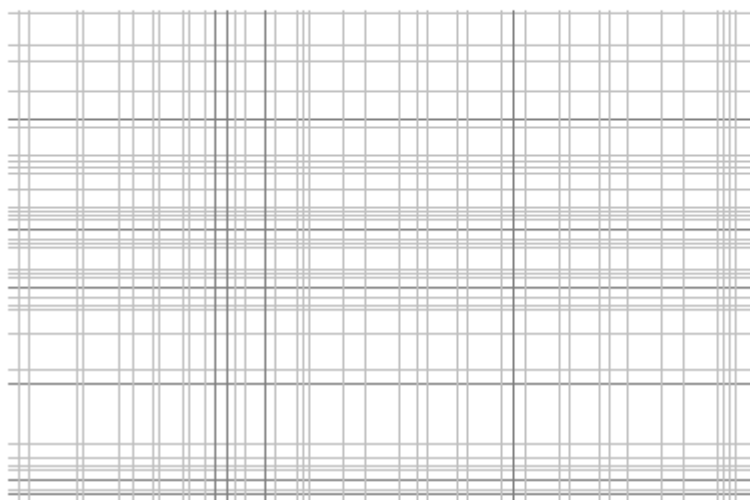
203	South	90
0	South	90

Sources:
2

Name	Type	Fraction	FileName	Associated Boundary
Source1	Air Exchange Source	-	ilmanvaihto.txt	ulkopinta2
Source2	Heat Source	-	teho.txt	-



Grid:



X-Direction:

Number of layers: 8
 Mode of generation: 2
 Number of elements: '17','17','2','2','2','2','31','31'
 Dimension [mm]: '125','125','15','15','15','15','300','300'
 Expansion factor: '1.0235','0.9770','1.4725','0.6791','1.4725','0.6791','1.0293','0.9715'

Y-Direction:

Number of layers: 8
 Mode of generation: 2
 Number of elements: '4','4','19','19','8','8','21','21'
 Dimension [mm]: '16.5','16.5','116','116','35','35','132.5','132.5'
 Expansion factor: '1.0206','0.9799','1.0448','0.9571','1.0254','0.9752','1.0432','0.9586'

Computational Parameters:

Timestep [s]: 3600
 Number of timesteps: 70080
 Convergence criterion: 5E-4
 Max. number of iterations: 1.5E3
 Include Heat of Evaporation: TRUE
 Include Heat of Fusion: TRUE
 Take capillary conduction into account: TRUE

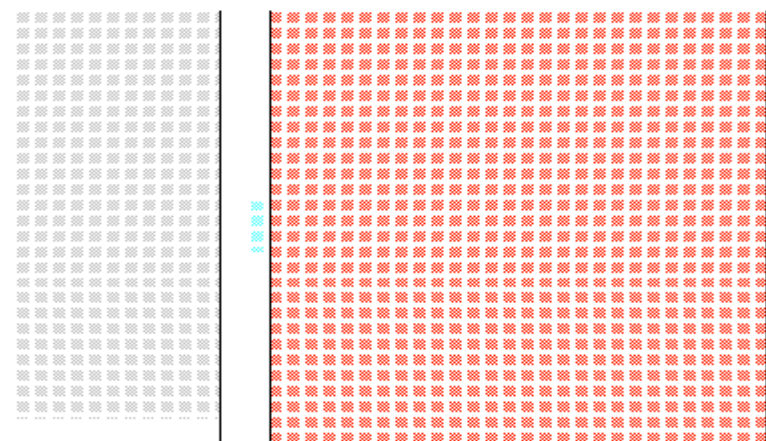
LIITE 4: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET,
RAKENNETYYPPI US2_3

WUFI2D Project Overview

Info:

Projectname: Diplomityö Noora
Contact:
Phone:
City-Zip:
Street:
Client: VR
Number: 9002
Remarks:
e-Mail:
Responsible:
Fax:
Comment:
Date of creation: 2010-08-30 12:10:28

Construction:



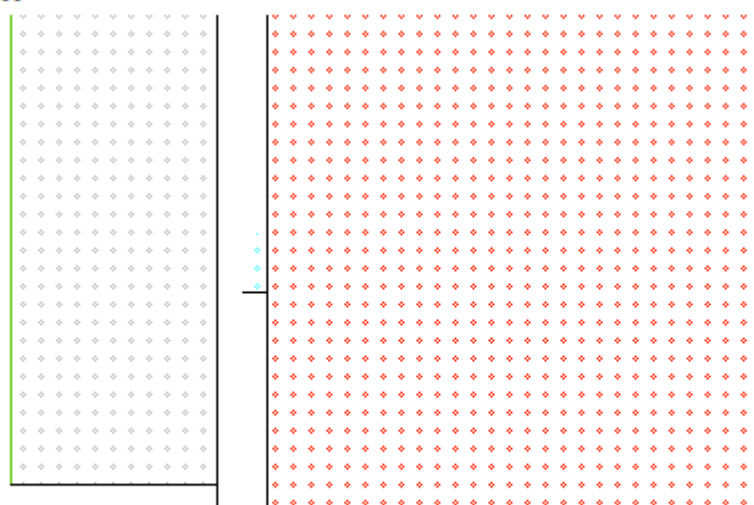
Rectangles / Orthogonal Polygons:

Name	XMaterialFilename	YMaterialFilename	Initial Theta	Initial Phi	Initial WaterContent 7
------	-------------------	-------------------	---------------	-------------	------------------------

r1	KristallinemetamorpheGesteineGranitBasaltMarmor.xml	ditto	15	0,9	0.1
r2	Kalkkisementtilaastihieno.xml	ditto	15	0.998146	115
r4	Tiilimuuri.xml	ditto	15	0.946355	60
r6	Ilmakerrosmmwithoutadditionalmoisturecapacity.xml	ditto	20	0.8	0.0

Outersurfaces:

11

**Surface Coefficients:**

Name	Heat Transfer Coefficient	SD-Value	Rain Absorption	Radiation Absorption	Radiation Emissivity 4
rakenne	0	0	0	0	0
ulkopinta	17	----	0,7	0.9	0.9
ulkopinta 2	17	----	1	0.4	0.9
sisäpinta	8	----	0	0	0

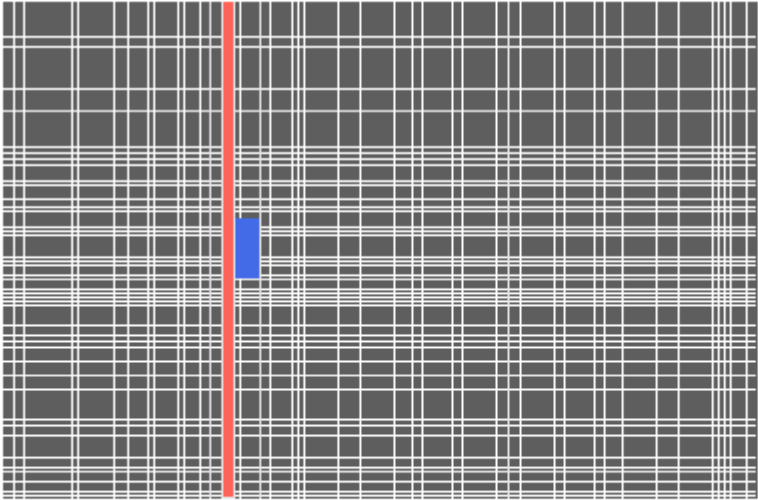
Climate:

ClimateFile	Orientation	Inclination
0	South	90
203	South	90

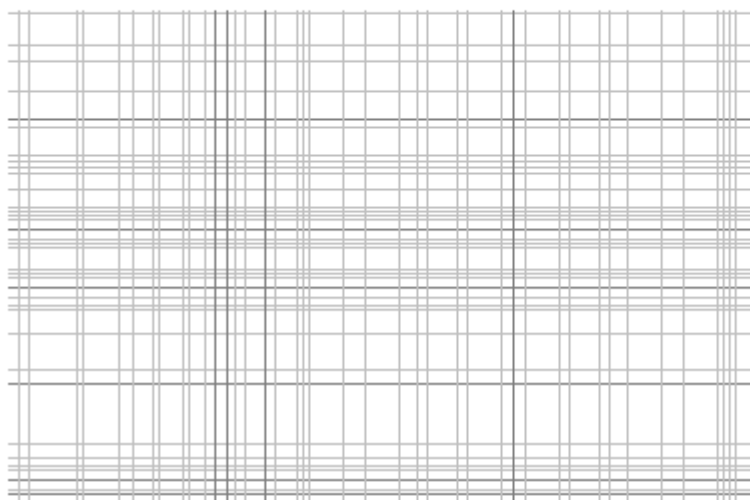
203	South	90
0	South	90

Sources:
2

Name	Type	Fraction	FileName	Associated Boundary
Source1	Heat Source	-	teho.txt	-
Source2	Air Exchange Source	-	ilmanvaihto.txt	ulkopinta 2



Grid:



X-Direction:

Number of layers: 8
 Mode of generation: 2
 Number of elements: '17','17','2','2','2','2','31','31'
 Dimension [mm]: '125','125','15','15','15','15','300','300'
 Expansion factor: '1.0235','0.9770','1.4725','0.6791','1.4725','0.6791','1.0293','0.9715'

Y-Direction:

Number of layers: 8
 Mode of generation: 2
 Number of elements: '4','4','19','19','8','8','21','21'
 Dimension [mm]: '16.5','16.5','116','116','35','35','132.5','132.5'
 Expansion factor: '1.0206','0.9799','1.0448','0.9571','1.0254','0.9752','1.0432','0.9586'

Computational Parameters:

Timestep [s]: 3600
 Number of timesteps: 70080
 Convergence criterion: 5E-4
 Max. number of iterations: 1.5E3
 Include Heat of Evaporation: TRUE
 Include Heat of Fusion: TRUE
 Take capillary conduction into account: TRUE

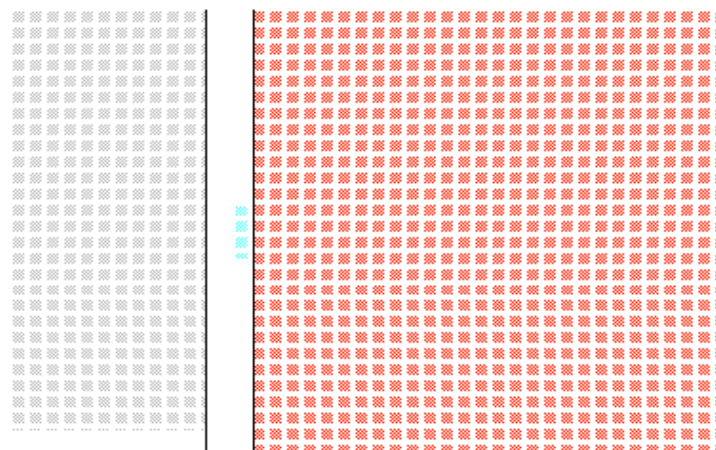
LIITE 5: LASKENTAOHJELMAN TULOSTEET, RAKENNETYYPPI US2_4

WUFI2D Project Overview

Info:

Projectname: Diplomityö
 Contact:
 Phone:
 City-Zip:
 Street:
 Client: VR
 Number: 9002
 Remarks:
 e-Mail:
 Responsible:
 Fax:
 Comment:
 Date of creation: 2010-08-09 10:09:04

Construction:



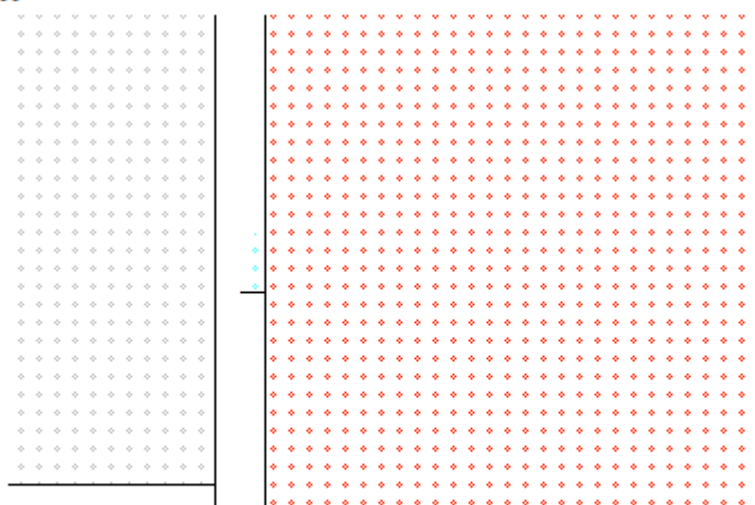
Rectangles / Orthogonal Polygons:

Name	XMaterialFilename	YMaterialFilename	Initial Theta	Initial Phi	Initial WaterContent
					7

r1	Kristallinemetamorphe Gesteine Granit Basalt Marmor.xml	ditto	15	0.8	0.0
r2	Kalkkisementtilaastihieno.xml	ditto	15	0.998146	115
r4	Tiilimuuri.xml	ditto	15	0.946355	60
r5	Ilmakerrosmmwithoutadditionalmoisturecapacity.xml	ditto	15	0.8	0.0

Outersurfaces:

11

**Surface Coefficients:**

Name	Heat Transfer Coefficient	SD-Value	Rain Absorption	Radiation Absorption	Radiation Emissivity 4
rakenne	0	0	0	0	0
ulkopinta	17	---	0,7	0.9	0.9
ulkopinta2	17	---	1	0.4	0.9
sisäpinta	8	0	0	0	0

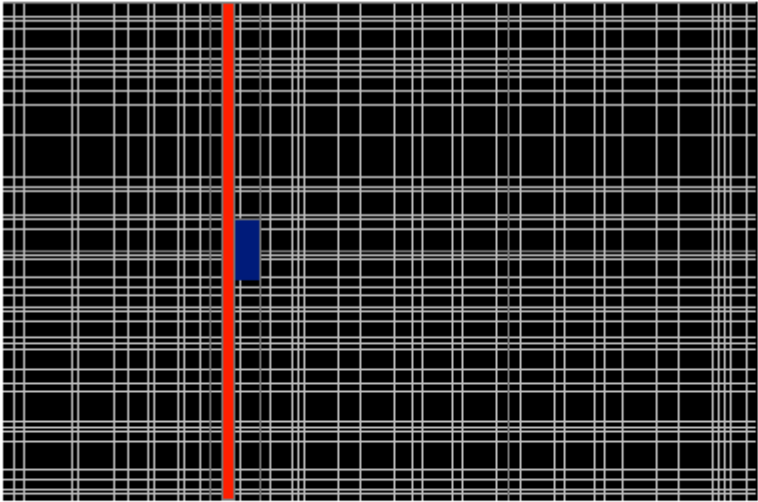
Climate:

ClimateFile	Orientation	Inclination
0	South	90
203	South	90
203	South	90

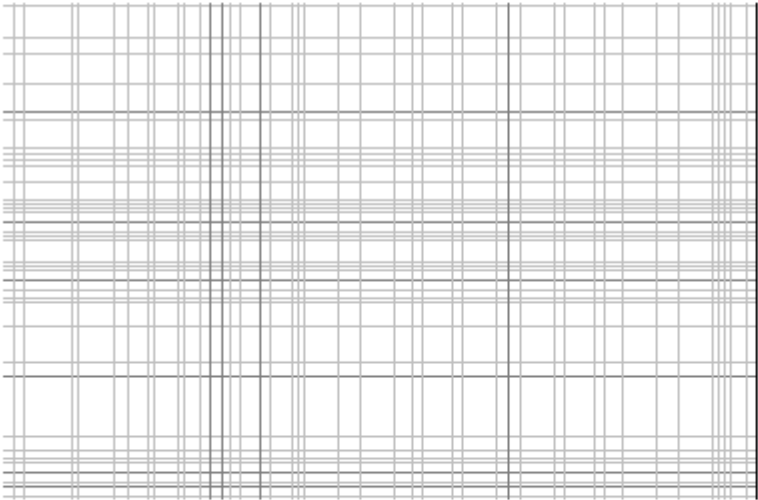
0	South	90
---	-------	----

Sources:
2

Name	Type	Fraction	FileName	Associated Boundary
Source1	Heat Source	-	teho.txt	-
Source2	Air Exchange Source	-	ilmanvaihto.txt	ulkopinta2



Grid:



X-Direction:

Number of layers: 8
 Mode of generation: 2
 Number of elements: '17','17','2','2','2','2','31','31'
 Dimension [mm]: '125','125','15','15','15','15','300','300'
 Expansion factor: '1.0235','0.9770','1.4725','0.6791','1.4725','0.6791','1.0293','0.9715'

Y-Direction:

Number of layers: 8
 Mode of generation: 2
 Number of elements: '4','4','19','19','8','8','21','21'
 Dimension [mm]: '16.5','16.5','116','116','35','35','132.5','132.5'
 Expansion factor: '1.0206','0.9799','1.0448','0.9571','1.0254','0.9752','1.0432','0.9586'

Computational Parameters:

Timestep [s]: 3600
 Number of timesteps: 70080
 Convergence criterion: 5E-4
 Max. number of iterations: 1.5E3
 Include Heat of Evaporation: TRUE
 Include Heat of Fusion: TRUE
 Take capillary conduction into account: TRUE

LIITE 6: LASKENTAOHJELMAN MATERIAALIOMINAISUUDET

Name: *8.4.1 Kristalline, metamorphe Gesteine (Granit, Basalt, Marmor)

Info:

NoMoistureTransport: FALSE

name	unit	value
Bulk Density	kg/m ³	2800,0
Porosity	m ³ /m ³	0,015
Spec. Heat Capacity	J/(kg*K)	850,0
Thermal Conductivity dry	W/(m*K)	3,5
Water Vapour Diffusion Resistance Factor dry	-	500
Reference Water Content	kg/m ³	
Relative Humidity	-	
Additional Point	kg/m ³	
Free Water Saturation	kg/m ³	
Water Absorption Coefficient	kg/(m ² *s ^{0.5})	
Drying Factor	-	10
Thermal Conductivity Supplement	%/M.-%	
Typical Built-In Moisture	kg/m ³	0,0
Thermal Conductivity Supplement	W/mK ²	
Thickness	m	3,5

name	version	Generated	GenerationMode	Items				
Moisture Storage Function	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [kg/m^3]</td></tr><tr><td>0,0</td><td>0,0</td></tr></table>	x [-]	y [kg/m^3]	0,0	0,0
x [-]	y [kg/m^3]							
0,0	0,0							
Liquid Transport Coefficient, Suction	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [m^2/s]</td></tr><tr><td>0,0</td><td>0,0</td></tr></table>	x [-]	y [m^2/s]	0,0	0,0
x [-]	y [m^2/s]							
0,0	0,0							
Liquid Transport Coefficient, Redistribution	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [m^2/s]</td></tr><tr><td>0,0</td><td>0,0</td></tr></table>	x [-]	y [m^2/s]	0,0	0,0
x [-]	y [m^2/s]							
0,0	0,0							
Thermal Conductivity, moisture-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [W/(m*K)]</td></tr><tr><td>0</td><td>3,5</td></tr></table>	x [-]	y [W/(m*K)]	0	3,5
x [-]	y [W/(m*K)]							
0	3,5							
Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [-]</td></tr><tr><td>0</td><td>500</td></tr></table>	x [-]	y [-]	0	500
x [-]	y [-]							
0	500							
Thermal Conductivity, temperature-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [°C]</td><td>y [W/(m*K)]</td></tr><tr><td>10</td><td>3,5</td></tr></table>	x [°C]	y [W/(m*K)]	10	3,5
x [°C]	y [W/(m*K)]							
10	3,5							
Enthalpy, temperature-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [°C]</td><td>y [J/kg]</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr></table>	x [°C]	y [J/kg]	0	0
x [°C]	y [J/kg]							
0	0							

Name: Kalkkilaasti hieno

Info: Oletusarvo lämpötilariippuvalle lämmönjohtumisen lisäykselle

NoMoistureTransport: FALSE

name	unit	value
Bulk Density	kg/m ³	1785,0
Porosity	m ³ /m ³	0,28
Spec. Heat Capacity	J/(kg*K)	850,0
Thermal Conductivity dry	W/(m*K)	0,7
Water Vapour Diffusion Resistance Factor dry	-	15,0
Reference Water Content	kg/m ³	6,533
Relative Humidity	-	
Additional Point	kg/m ³	
Free Water Saturation	kg/m ³	247,596
Water Absorption Coefficient	kg/(m ² *s ^{0.5})	0,153
Drying Factor	-	10
Thermal Conductivity Supplement	%/M.-%	6,247
Typical Built-In Moisture	kg/m ³	247,6
Thermal Conductivity Supplement	W/mK ²	0,0002
Thickness	m	

name	version	Generated	GenerationMode	Items	
Moisture Storage Function	1	FALSE	0	x [-]	y [kg/m ³]
				0,0	0,0
				0,3	2,17415
				0,5	3,359918
				0,7	5,075537
				0,8	6,533315
				0,9	9,453365
				0,95	13,24453
				0,99	29,4718
				0,9946301	42,09624
				0,9969768	61,08613
				0,9982988	91,81341
				0,9989263	125,0
				0,9992397	150,42
				0,9993961	165,4379
				0,9994617	172,1337
				0,9995202	178,2656
				0,9996603	193,5
				0,9996973	197,6501
				0,999809	210,7162
				0,9998926	221,5621

name	version	Generated	GenerationMode	Items	
				0,999952	231,0637
				0,9999879	240,1083
				1,0	247,5962
Liquid Transport Coefficient, Suction	1	FALSE	0	x [-]	y [m ² /s]
				9,453365	9.49722E-10
				13,24453	6.25614E-10
				29,4718	7.32038E-10
				42,09624	1.1235E-9
				61,08613	2.19343E-9
				91,81341	6.51575E-9
				125,0	2.11345E-8
				150,42	5.20536E-8
				165,4379	8.86593E-8
				172,1337	1.12418E-7
				178,2656	1.39723E-7
				193,5	2.39815E-7
				197,6501	2.77835E-7
				210,7162	4.41574E-7
				221,5621	6.48677E-7
				231,0637	9.08556E-7
				240,1083	1.25209E-6
				247,5962	1.63287E-6
Liquid Transport Coefficient, Redistribution	1	FALSE	0	x [-]	y [m ² /s]
				9,453365	9.49722E-10
				13,24453	6.25614E-10
				29,4718	7.32038E-10
				42,09624	1.1235E-9
				61,08613	2.19343E-9
				91,81341	6.51575E-9
				125,0	2.11345E-8
				150,42	5.20536E-8
				165,4379	8.86593E-8
				172,1337	1.12418E-7
				178,2656	1.39723E-7
				193,5	2.39815E-7
				197,6501	2.77835E-7

name	version	Generated	GenerationMode	Items														
				<table><tr><td>210,7162</td><td>4.41574E-7</td></tr><tr><td>221,5621</td><td>6.48677E-7</td></tr><tr><td>231,0637</td><td>9.08556E-7</td></tr><tr><td>240,1083</td><td>1.25209E-6</td></tr><tr><td>247,5962</td><td>1.63287E-6</td></tr></table>	210,7162	4.41574E-7	221,5621	6.48677E-7	231,0637	9.08556E-7	240,1083	1.25209E-6	247,5962	1.63287E-6				
210,7162	4.41574E-7																	
221,5621	6.48677E-7																	
231,0637	9.08556E-7																	
240,1083	1.25209E-6																	
247,5962	1.63287E-6																	
Thermal Conductivity, moisture-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [W/(m*K)]</td></tr><tr><td>0</td><td>0,7</td></tr><tr><td>247,5962</td><td>1,306611</td></tr></table>	x [-]	y [W/(m*K)]	0	0,7	247,5962	1,306611								
x [-]	y [W/(m*K)]																	
0	0,7																	
247,5962	1,306611																	
Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [-]</td></tr><tr><td>0</td><td>15,0</td></tr><tr><td>0,5</td><td>14,99575</td></tr><tr><td>0,7</td><td>14,26287</td></tr><tr><td>0,8</td><td>13,21404</td></tr><tr><td>0,9</td><td>10,08297</td></tr><tr><td>0,95</td><td>5,72511</td></tr></table>	x [-]	y [-]	0	15,0	0,5	14,99575	0,7	14,26287	0,8	13,21404	0,9	10,08297	0,95	5,72511
x [-]	y [-]																	
0	15,0																	
0,5	14,99575																	
0,7	14,26287																	
0,8	13,21404																	
0,9	10,08297																	
0,95	5,72511																	
Thermal Conductivity, temperature-dependent	1	TRUE	0	<table><tr><td>x [°C]</td><td>y [W/(m*K)]</td></tr><tr><td>10</td><td>0,7</td></tr></table>	x [°C]	y [W/(m*K)]	10	0,7										
x [°C]	y [W/(m*K)]																	
10	0,7																	
Enthalpy, temperature-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [°C]</td><td>y [J/kg]</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr></table>	x [°C]	y [J/kg]	0	0										
x [°C]	y [J/kg]																	
0	0																	

Name: Kalkkisementtilaasti hieno

Info: Oletusarvo lämpötilariippuvalle lämmönjohtumisen lisäykselle

NoMoistureTransport: FALSE

name	unit	value
Bulk Density	kg/m ³	1880,0
Porosity	m ³ /m ³	0,28
Spec. Heat Capacity	J/(kg*K)	850,0
Thermal Conductivity dry	W/(m*K)	0,6
Water Vapour Diffusion Resistance Factor dry	-	50,0
Reference Water Content	kg/m ³	25,664
Relative Humidity	-	
Additional Point	kg/m ³	
Free Water Saturation	kg/m ³	210,0
Water Absorption Coefficient	kg/(m ² *s ^{0.5})	0,057
Drying Factor	-	10
Thermal Conductivity Supplement	%/M.-%	10,254
Typical Built-In Moisture	kg/m ³	210,0
Thermal Conductivity Supplement	W/mK ²	0,0002
Thickness	m	

name	version	Generated	GenerationMode	Items	
Moisture Storage Function	1	FALSE	0	x [-]	y [kg/m ³]
				0,0	0,0
				0,3	12,7919
				0,5	15,88387
				0,7	20,97798
				0,8	25,66399
				0,9	35,27735
				0,95	46,93478
				0,99	79,47502
				0,9946274	92,73695
				0,9969752	104,7612
				0,9982979	116,3299
				0,9989257	125,1533
				0,9992393	131,4889
				0,9993957	135,5725
				0,9994614	137,5717
				0,99952	139,5423
				0,9996602	145,283
				0,9996971	147,1397
				0,9998089	154,2871
				0,9998925	162,6112

name	version	Generated	GenerationMode	Items	
				0,999952	173,1991
				0,9999879	188,7992
				1,0	210,0001
Liquid Transport Coefficient, Suction	1	FALSE	0	x [-]	y [m ² /s]
				35,27735	2.76025E-10
				46,93478	3.78235E-10
				79,47502	1.37383E-9
				92,73695	2.38091E-9
				104,7612	3.92488E-9
				116,3299	6.35111E-9
				125,1533	9.16886E-9
				131,4889	1.19351E-8
				135,5725	1.41461E-8
				137,5717	1.53736E-8
				139,5423	1.66876E-8
				145,283	2.11914E-8
				147,1397	2.28941E-8
				154,2871	3.08262E-8
				162,6112	4.35899E-8
				173,1991	6.77288E-8
				188,7992	1.29647E-7
				210,0001	3.13325E-7
Liquid Transport Coefficient, Redistribution	1	FALSE	0	x [-]	y [m ² /s]
				35,27735	2.76025E-10
				46,93478	3.78235E-10
				79,47502	1.37383E-9
				92,73695	2.38091E-9
				104,7612	3.92488E-9
				116,3299	6.35111E-9
				125,1533	9.16886E-9
				131,4889	1.19351E-8
				135,5725	1.41461E-8
				137,5717	1.53736E-8
				139,5423	1.66876E-8
				145,283	2.11914E-8
				147,1397	2.28941E-8
				154,2871	3.08262E-8
				162,6112	4.35899E-8

name	version	Generated	GenerationMode	Items														
				<table><tr><td>173,1991</td><td>6.77288E-8</td></tr><tr><td>188,7992</td><td>1.29647E-7</td></tr><tr><td>210,0001</td><td>3.13325E-7</td></tr></table>	173,1991	6.77288E-8	188,7992	1.29647E-7	210,0001	3.13325E-7								
173,1991	6.77288E-8																	
188,7992	1.29647E-7																	
210,0001	3.13325E-7																	
Thermal Conductivity, moisture-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [W/(m*K)]</td></tr><tr><td>0</td><td>0,6</td></tr><tr><td>210,0001</td><td>1,287204</td></tr></table>	x [-]	y [W/(m*K)]	0	0,6	210,0001	1,287204								
x [-]	y [W/(m*K)]																	
0	0,6																	
210,0001	1,287204																	
Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [-]</td></tr><tr><td>0</td><td>50,0</td></tr><tr><td>0,5</td><td>41,62175</td></tr><tr><td>0,7</td><td>33,78559</td></tr><tr><td>0,8</td><td>24,94614</td></tr><tr><td>0,9</td><td>10,58151</td></tr><tr><td>0,95</td><td>3,268587</td></tr></table>	x [-]	y [-]	0	50,0	0,5	41,62175	0,7	33,78559	0,8	24,94614	0,9	10,58151	0,95	3,268587
x [-]	y [-]																	
0	50,0																	
0,5	41,62175																	
0,7	33,78559																	
0,8	24,94614																	
0,9	10,58151																	
0,95	3,268587																	
Thermal Conductivity, temperature-dependent	1	TRUE	0	<table><tr><td>x [°C]</td><td>y [W/(m*K)]</td></tr><tr><td>10</td><td>0,6</td></tr></table>	x [°C]	y [W/(m*K)]	10	0,6										
x [°C]	y [W/(m*K)]																	
10	0,6																	
Enthalpy, temperature-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [°C]</td><td>y [J/kg]</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr></table>	x [°C]	y [J/kg]	0	0										
x [°C]	y [J/kg]																	
0	0																	

Name: Ilmakerros 10 mm; without additional moisture capacity

Info: Teholliset ominaisuudet sisältävät konvektion ja säteilyn ominaisuudet. Ilmakerros täyttyy syöttää kerrosrakenteena käyttäen oikeaa paksuutta. No additional moisture capacity (e.g. moisture film at bordering surfaces). This can cause numerical problems.

NoMoistureTransport: FALSE

name	unit	value
Bulk Density	kg/m ³	1,3
Porosity	m ³ /m ³	0,001
Spec. Heat Capacity	J/(kg*K)	1000,0
Thermal Conductivity dry	W/(m*K)	0,071
Water Vapour Diffusion Resistance Factor dry	-	0,73
Reference Water Content	kg/m ³	
Relative Humidity	-	
Additional Point	kg/m ³	
Free Water Saturation	kg/m ³	
Water Absorption Coefficient	kg/(m ² *s ^{0.5})	
Drying Factor	-	10
Thermal Conductivity Supplement	%/M.-%	
Typical Built-In Moisture	kg/m ³	0,01
Thermal Conductivity Supplement	W/mK ²	
Thickness	m	

name	version	Generated	GenerationMode	Items						
Moisture Storage Function	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [kg/m^3]</td></tr><tr><td>0,0</td><td>0,0</td></tr><tr><td>1,0</td><td>0,017</td></tr></table>	x [-]	y [kg/m^3]	0,0	0,0	1,0	0,017
x [-]	y [kg/m^3]									
0,0	0,0									
1,0	0,017									
Liquid Transport Coefficient, Suction	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [m^2/s]</td></tr><tr><td>0,0</td><td>0,0</td></tr></table>	x [-]	y [m^2/s]	0,0	0,0		
x [-]	y [m^2/s]									
0,0	0,0									
Liquid Transport Coefficient, Redistribution	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [m^2/s]</td></tr><tr><td>0,0</td><td>0,0</td></tr></table>	x [-]	y [m^2/s]	0,0	0,0		
x [-]	y [m^2/s]									
0,0	0,0									
Thermal Conductivity, moisture-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [W/(m*K)]</td></tr><tr><td>0</td><td>0,071</td></tr></table>	x [-]	y [W/(m*K)]	0	0,071		
x [-]	y [W/(m*K)]									
0	0,071									
Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [-]</td><td>y [-]</td></tr><tr><td>0</td><td>0,73</td></tr></table>	x [-]	y [-]	0	0,73		
x [-]	y [-]									
0	0,73									
Thermal Conductivity, temperature-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [°C]</td><td>y [W/(m*K)]</td></tr><tr><td>10</td><td>0,071</td></tr></table>	x [°C]	y [W/(m*K)]	10	0,071		
x [°C]	y [W/(m*K)]									
10	0,071									
Enthalpy, temperature-dependent	1	FALSE	0	<table><tr><td>x [°C]</td><td>y [J/kg]</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr></table>	x [°C]	y [J/kg]	0	0		
x [°C]	y [J/kg]									
0	0									

Name: Tiilimuuri

Info: Tiilimuuraus sisältäen laastisaumat; tasapainokosteuskäyrät on arvioitu w80:sta ja wf:sta

Oletusarvo lämpötilariippuvalla lämmönjohtumisen lisäykselle

NoMoistureTransport: FALSE

Color: \$FF

name	unit	value
Bulk Density	kg/m ³	1900,0
Porosity	m ³ /m ³	0,24
Spec. Heat Capacity	J/(kg*K)	850,0
Thermal Conductivity dry	W/(m*K)	0,6
Water Vapour Diffusion Resistance Factor dry	-	10,0
Reference Water Content	kg/m ³	18,0
Relative Humidity	-	
Additional Point	kg/m ³	
Free Water Saturation	kg/m ³	190,0
Water Absorption Coefficient	kg/(m ² *s ^{0.5})	0,11
Drying Factor	-	10
Thermal Conductivity Supplement	%/M.-%	15,0
Typical Built-In Moisture	kg/m ³	100,0
Thermal Conductivity Supplement	W/mK ²	0,0002
Thickness	m	

name	version	Generated	GenerationMode	Items	
Moisture Storage Function	1	TRUE	0	x [-]	y [kg/m ³]
				0	0
				0,1	0,55
				0,2	1,23
				0,3	2,11
				0,4	3,26
				0,5	4,84
				0,55	5,89
				0,6	7,17
				0,65	8,8
				0,7	10,93
				0,75	13,83
				0,8	18,0
				0,85	24,53
				0,9	36,21
				0,91	39,75
				0,92	43,94
				0,93	49,01

name	version	Generated	GenerationMode	Items	
				0,94	55,24
				0,95	63,09
				0,96	73,29
				0,97	87,07
				0,98	106,74
				0,99	137,08
				1,0	190
Liquid Transport Coefficient, Suction	1	FALSE	0	x [-]	y [m ² /s]
				0,0	0,0
				10,0	1.5E-10
				190,0	1.7E-6
Liquid Transport Coefficient, Redistribution	1	FALSE	0	x [-]	y [m ² /s]
				0,0	0,0
				10,0	1.5E-10
				190,0	1.7E-8
Thermal Conductivity, moisture-dependent	1	TRUE	0	x [-]	y [W/(m*K)]
				0	0,6
Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-dependent	1	FALSE	0	x [-]	y [-]
				0	10,0
Thermal Conductivity, temperature-dependent	1	TRUE	0	x [°C]	y [W/(m*K)]
				10	0,6
Enthalpy, temperature-dependent	1	FALSE	0	x [°C]	y [J/kg]
				0	0

LIITE 7: LASKUESIMERKKI

Tuu letuskanaava		Re lämmin		16	Re kylmä		7					
b_{huone}	0,6	$d(2ab/(a+b))$		0,042	$f(96/R_e)$		6					
b	0,03	$osa1(\rho L/d)$		42,86	$Kb(murtka\ 90)$		1,2 (kaava 4.38)					
a	0,07	$osa2(\rho L/d)$		171,43	$Kc(supistus)$		1,901783898 (kaava 4.38)					
l_{putki}	0,4	$osa3(\rho L/d)$		42,86	$Ke(lanjeruus)$		1,556803801 (kaava 4.38)					
ϕ_{putki}	0,012	$putki(\rho L/d)$		200	$Kc(supistus)$		1,794498529 (kaava 4.38)					
kunkausl p (tiley s)		v (kineemaati. v c (omn. lämpö))		T (ulkolima)		Δp tuuli (kaava 4.35)		Δp ilma (kaava 4.36)		r_s (kaava 4.39)		
1	1,316	0,000012850		1006	-4,975		-5,7	2,322	0,019	=	0,0158	0,0021
2	1,316	0,000012850		1006	-4,838		-5,7	2,001	0,022	=	0,0158	0,0021
3	1,299	0,000013270		1006	-1,313		-2,1	2,183	0,020	=	0,0166	0,0022
4	1,260	0,000014170		1006	7,000		3,1	2,016	0,101	=	0,0962	0,0054
5	1,229	0,000014620		1006	14,000		9,7	1,870	0,111	=	0,0999	0,0056
6	1,208	0,000015070		1006	19,000		15	1,745	0,103	=	0,1043	0,0057
7	1,200	0,000015070		1006	21,000		17	1,470	0,103	=	0,1036	0,0057
8	1,204	0,000015070		1006	20,000		15,7	1,392	0,111	=	0,1040	0,0057
9	1,229	0,000014620		1006	14,000		11,1	1,683	0,075	=	0,0999	0,0056
10	1,251	0,000014170		1006	9,000		6,4	2,103	0,067	=	0,0955	0,0054
11	1,269	0,000013720		1006	5,000		1,4	2,239	0,093	=	0,0908	0,0052
12	1,304	0,000013270		1006	-2,375		-2,9	2,410	0,014	=	0,0167	0,0022
										$k_{a, (lämmin)}$		0,006 m/s
										$k_{a, (kylmä)}$		0,002 m/s